

内部振動機によるコンクリートの振動締固めに関する研究

著者	坂本 信義
学位授与大学	東洋大学
取得学位	博士
学位の分野	工学
報告番号	乙第73号
学位授与年月日	1993-10-18
URL	http://id.nii.ac.jp/1060/00004037/

第 4 章

内部振動機の諸特性とコンクリート中 の振動との関係

第4章 内部振動機の諸特性とコンクリート中の振動との関係

－主として締固め時における振動特性とその影響要因－

4.1 振動の締固め作用を表すパラメータ

(1) 既往の研究

振動の締固め作用を量的に表示しようとする試みは、S. G. Bergstrom¹⁾、S. Venkatramaiah¹⁴⁾、志水²⁷⁾、L. Forssblad²⁸⁾、J. W. Plowman³¹⁾、J. Kolek³⁴⁾、神山³⁶⁾、J. Csnstar⁵⁴⁾、村田⁹⁶⁾、L'Hermitte¹⁴³⁾、岩崎¹⁵⁷⁾ らが行っているが、これらの研究において振動の締固め作用の指標として提案あるいは用いているパラメータは、エネルギー、仕事、加速度、および液状化作用値に大別できる。

a. エネルギー

エネルギーを締固め作用の指標としている代表例は振動ローラを用いて締固めるRCDコンクリートを対象とした志水¹²⁷⁾らの締固めエネルギーであって締固めエネルギーを次式で与えている。

振動ローラに対して、

$$E = 2a \left(W + \frac{F}{2} \right) \cdot \frac{L}{V} \cdot n \cdot N \cdot \frac{1}{B \cdot L}$$

ここに、

E : 締固めエネルギー (kgf・cm/cm²)

a : 振動輪の片振幅 (cm)

W : 振動輪の軸荷重 (kgf)

F : 起振力 (kgf)

V : 転圧速度 (cm/min)

L : 振動輪の接地長さ (cm)

n : 振動数 (r・p・m)

N : 振動輪の転圧回数 (回)

B : 締固め幅 (cm)

試験装置(表面振動機)に対して、

$$E = 2a \left(W + \frac{F}{2} \right) \cdot T \cdot n \cdot \frac{1}{A}$$

かつ剛体として、緻密なコンクリートの円筒が振動機と同調して共振することが仮定される。そのとき存在するコンクリート円筒の重量を G_B 、振動機と可焼軸部分の重量和を G_V とすれば、共振質量は、 $m = G_V + G_B / g$ となる。

E : 締固めエネルギー (kgf・cm/cm²)

a : 振動輪の片振幅 (cm)

W : 載荷荷重 (kgf)

F : 起振力 (kgf)

T : 締固め時間 (min)

n : 振動数 (r・p・m)

A : 転圧面積 (cm²)

b. 仕事

仕事を締固め作用の指標としているものとして、Venkatramaiah¹⁴⁾の純仕事量と村田¹²⁰⁾の総仕事量があり、前者は電動式振動台を用いて重量既値のコンクリートを締固めた場合の電氣的損失と摩擦損失を評価しこれを1サイクル当たりの総仕事量から差引いたものを純仕事量として締固め作用の指標とするのに対して、後者では、コンクリートの応答振動に着目して、振動時間 t の間の総仕事量を次式で求めている。

$$\text{総仕事量 } W_R = \rho \pi^2 f^2 a^2 t$$

W_R : 総仕事量 (erg・s/cm²)

ρ : コンクリートの密度 (g/cm³)

f : コンクリートの応答振動数 (Hz)

a : コンクリートの応答振幅 (cm)

t : 振動時間 (s)

また、J. Csutor⁵⁵⁾ は、内部振動機が行う仕事は、最初運動中の振動質量を保有し、それは、コンクリートの容積変化の必要仕事を疎状態から密状態までにいたって網羅する。すなわち $L = L_m + L_d$ で仕事 L_d は、 L_m のうえに重畳される付加的量である点に注意されたいとして、この付加的エネルギーは、コンクリート量が装置の作用半径内では実際上剛体であり、かつコンクリート濃縮中に状態の変化を全く受けない場合は余分となる。 $L_m = 2m a_0 2A_0$, $L = 2C_0 A_0 \pi \sin \varepsilon$, の両式は、振動励起の場合関係があるのは円振動のため、式 $L = C_0 A_0 \pi \sin \varepsilon$ に相対していることが分かる。

式 $L = 2m a_0 2A_0$ と $L = 2C_0 A_0 \pi \sin \varepsilon$ に振動系の基本変数と共に個々の量を代入すれば式 $L = L_m + L_d$ は次のような式に変化する。

$$C_0 \frac{M}{G_v} \pi \sin \varepsilon = 2C_0 \frac{M}{G_v + G_B} + L_d$$

上式から、

$$L_d = C_0 M \left[\frac{\pi \sin \varepsilon}{G_v} - \frac{2}{G_v + G_B} \right]$$

(C_0 =遠心力, M =運動モーメント, ε =位相角)

疎状態と密状態のコンクリートが容積的に差異を持たないため($\beta=1$ 濃縮化偏数)、または濃縮(最終状態)がすでに達成されるため $L_d=0$ の時は、 G_B により表現される濃縮装置の変換作用とコンクリートの組成に依存する位相角の値として次式が生ずる。

$$\sin \Sigma > 2 / \pi \cdot 1 / 1 + G_B / G_v$$

このように品質的に等しいコンクリートの濃縮は、集約化された消費仕事に相応して その際この成分は個別に決定できると報告している。

c. 加速度

締固めの進行過程を加速度を含む数式で表示した初期のものとして、J. Koles²⁵⁾の次式がある。

$$C_x = C_m - (C_m - C_o) \exp \{ - (w^2 a / g) t_x \cdot f_w K \}$$

ここに

C_x : 締固め時間 t_x における締固め度

C_o : 締固め開始時における締固め度

C_m : 最大締固め度

t_x : 締固め時間

w : 角振動数

a : 振幅

g : 重力加速度

f_w : コンクリートのワーカビリティに関する定数

$f_w = C_o / C_m$ の比

K : 定数

ただし、この式は振動の加速度がいかに小さくても振動時間を長くすることによって締固めは最大締固め度に限りなく近づくことを示しているので、実用上の適用の可否は別として、この点において、締固めにはある限度以上の加速度を必要とする事実と矛盾する。

神山³⁶⁾らは内部振動機から伝播するコンクリート中の圧力波を測定し、その結果から求めた振動加速度を重力加速度に対する比で表して伝播距離との関係を数式化している(3.3.1)。

d. 液状化作用値

岩崎¹⁵⁷⁾は、正弦波形をもつ進行波がコンクリートの固体粒子間のかみ合いを解放して液状化させる作用を次のように考え、液状化作用値の概念を導入している。

粒子間の相対変位と単位時間に起こる運動の回数が多いほど液状化しやすいから振動の液状化作用は変位勾配と振動数に比例する。

進行波を

$$\xi = a \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right)$$

a : 振幅

ω : 角振動数

c : 波動の進行速度

で表すと、 $x = x$ における変位勾配は

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{a \omega}{c} \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right)$$

液状化作用を L とすると、振動数を f として

$$L \propto n \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)_{\max} = \frac{a f \omega}{c} = \frac{a \omega^2}{2 \pi c}$$

一方、振動の加速度

$$\alpha = \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = -a \omega^2 \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right)$$

より、加速度振幅を α_{\max} とすると

$$L \propto \frac{\alpha_{\max}}{2 \pi c}$$

となる。

すなわち、液状化作用は振動の加速度に比例することがわかる。

岩崎は、その後さらに詳細な解析を行い、振動の液状化作用値 L_v を提案しているが、基本的には、液状化作用は振動の加速度に比例し、波速に反比例すると考えてよい。

(2) 本研究で用いたパラメータ

既往の研究で用いられ、あるいは提案されているパラメータのうち、エネルギーおよび仕事は、振動の締固め作用というよりはむしろ振動力がコンクリートに対して作用した結果を表すものであって、振動ローラや振動台のように振動力の作用方向(鉛直方向)がコンクリートの沈下方向と一致する場合に適しているが、内部振動機の振動方向は水平方向であるから、コンクリートは水平振動によって液状化して重力によって締固まると考えるのが妥当である。したがって、内部振動機の締固め作用

としては液状化作用を用いるのが適切であるが、波速は、波動伝播の媒体であるフレッシュコンクリート自体の性質だけで定まり、振動機の特
性とは無関係である。そこで、振動機の諸特性を研究対象とした本章
においては主として振動加速度を締固め性能を表す指標と考えて検討した。

なお、本論文においては、振動機の振動数を $v.p.m$ または $r.p.m$ 単
位で表す場合には記号 n を用い、Hz 単位で表す場合には f を用いる
ことに統一した。

4.2 締固め中における振動機の振動性状

4.2.1 まえがき

振動発生機構を有する機器を利用して、コンクリートの締固めを実施
する場合には、打込んだコンクリートに適した振動数と振幅の複合効果
を適切に選択し用いることが重要であると考えられるが、過去において
は、振動機の機械的な技術面と使用経験から振動数が $7000vpm \sim 9000vpm$
で振幅が $0.20mm \sim 0.35mm$ 位の内部振動機の機種が一般的であった。

現在においては、振動機の中核でもある内蔵電動機の性能もよく、さ
らに小型化されて高速振動に対しても改善された構造の振動機が開発さ
れて、耐久性も高くなっているのが現状である。

また、内部振動機の振動発生源となる振動筒は、筒内に偏心重錘を装
備していて、振動筒の直径が大きくなって偏心重錘が大きく重くなるこ
とによって遠心力および加速度振幅が大きくなることが知られていて、
コンクリートの締固めには太径の振動筒が有効である。しかし、技術者
の人的手作業の場合には、その太さによる重量が負担となるので、締固
めの有効性よりはむしろ軽減量化された振動機を用いた締固め作業の方
が能率よくなる場合も考えられる。

一般の施工においては、土木工事関係では $\phi 50mm$ および $\phi 60mm$ 建築
工事関係では $\phi 40mm$, $\phi 50mm$ 振動筒径が使用されている。

そこで、本章では、振動筒部分の交換が可能でかつ振動数を任意に設
定することのできるインバータ式内部振動機を用いて、実際に締固め中
の振動加速度を測定し、締固め性能に関係する諸要因を検討した。

4.2.2 加速度の測定方法

コンクリートの振動締固めを実施するに際しての加速度振幅の測定は以下の手順によって行った。

振動機およびコンクリート中の加速度振幅の測定システム

(内部振動機の使用方法的選定+コンクリート性質の決定)



加速度センサーの設置位置の決定

(型枠内のコンクリート中の埋設位置の決定)



インバータによる周波数の選定

(3000~18000 vpm)



動ひずみ測定器の調整と設定範囲の確定

(DPM-613B 型式 8チャンネル)



電磁オッシログラフの準備

(校正波形の適正化+記録紙の速度設定)



振動締固め時間の決定



コンクリート中の加速度の計算

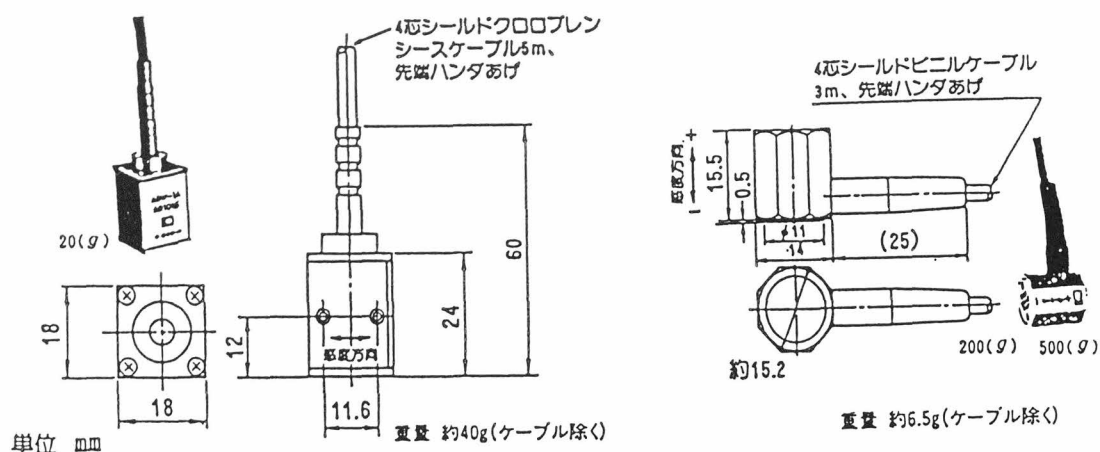
(PC9801-RA)



表示

(プリンター PC-PR201GS)

内部振動機よりコンクリート中に伝播される波動を測定するために加速度センサー(図-4.1)を用いて、内部振動機の筒表面(500gのもの)に取り付けと並行してコンクリート中(20gのもの)に埋設し各々の位置での加速度を測定した。



コンクリート中に埋設した加速度計 振動機に取り付けた加速度計
図-4.1 実験に使用した加速度計

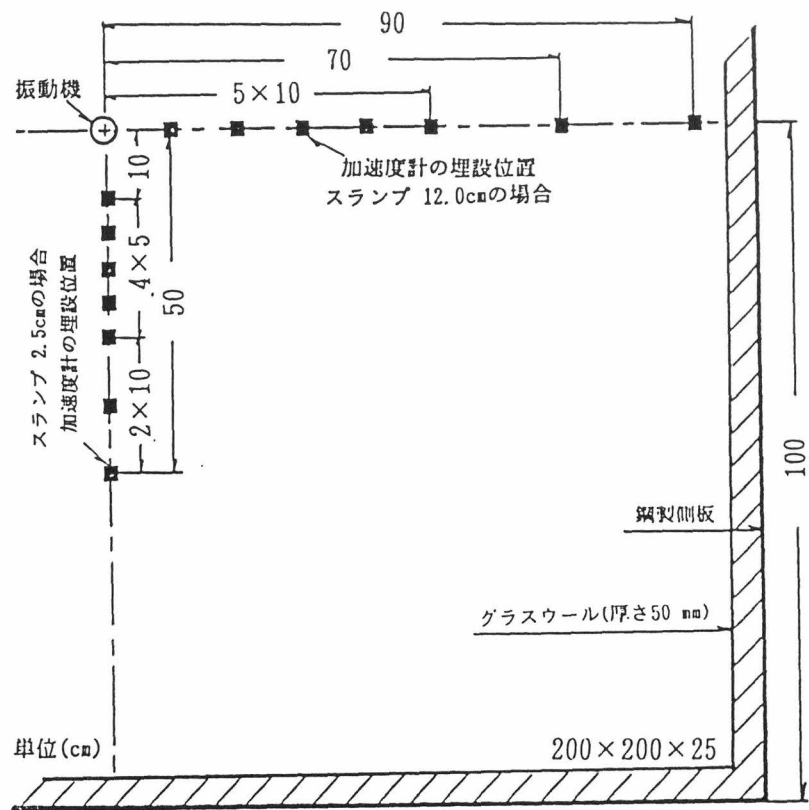
表 4.1 実験に使用した加速度計の特性

加速度センサー (温度 20°C, 湿度 60%)		
使用法	加速度計 (g)	振動数 (Hz)
内部振動機用	500(200)	0 ~ 3000 (2100)
コンクリート用	20	0 ~ 250

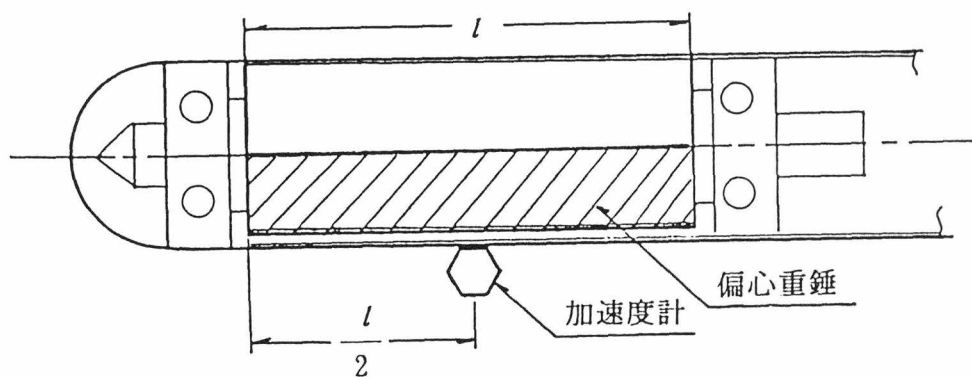
図-4.2 の示した鋼製型枠に振動機を中心からの距離 10 cm, 20 cm, 30cm, 40cm, 50cm, 70cm と 90cmの位置のコンクリートの表面から深さ 10cm の位置に埋設した。また、内部振動機の場合には、(図-4.3)のよう
に振動筒表面の偏心重錘の中心に示す位置に固定させて測定した。

また、振動伝棒の反射防止措置のため型枠せき板に厚さ50mmのグラスウールと底板に厚さ10mmのゴムマットを取り付けて実験を行った。

加速度測定のための振動締固め実験では、内部振動機の振動部(筒先)をコンクリート中に挿入し始めてから振動時間を 5, 10, 15, 20, 25, 30秒と 60秒の各々において加速度を測定した。



図－4.2 実験に使用した型枠と加速度計の埋設位置



図－4.3 振動機の加速度測定位置

4.2.3 無負荷時と締固め時における振動機の振動特性

内部振動機を用いてコンクリートを締固めた場合の加速度振幅の影響は、振動機がまだコンクリート中に挿入されていない状態にある無負荷時と、締固めが開始されて振動機がコンクリート中に挿入されてコンクリートの負荷抵抗を負担しながら作動している状態での加速度振幅とに分けることができる。

無負荷時での振動機の加速度振幅の値は、振動機自身の機械的特性を示す重要な要因であり、コンクリート中に挿入した状態での加速度振幅の損失低下の程度は、振動機とコンクリートとの双方の関係が適切な締固め性状であるか否かを判断するための重要な要因となる。

このように、振動機の無負荷時の特性特性振動締固め中の加速度の損失低下を理解することが必要であると考え、振動機の特性を検討した。

表 4.2 内部振動機の無負荷時の振動特性

筒直径 ϕ (mm)	振動数 (vpm)									
	18000		15000		12000		9000		6000	
	加速度 (g)	振幅 (mm)	加速度 (g)	振幅 (mm)	加速度 (g)	振幅 (mm)	加速度 (g)	振幅 (mm)	加速度 (g)	振幅 (mm)
30	166.11	0.575	140.81	0.602	97.44	0.611	55.39	0.628	25.73	0.652
40	141.06	0.488	109.62	0.469	78.08	0.490	45.38	0.515	21.92	0.556
50	173.85	0.601	148.08	0.634	107.96	0.677	61.75	0.701	26.92	0.683
60	202.13	0.699	143.65	0.615	96.15	0.603	55.05	0.625	25.89	0.656

(1) 振動筒の振動数と加速度振幅との関係

振動機の無負荷時による加速度振幅および締固め中の振動機の加速度振幅は、振動筒表面で偏心重錘の中心位置に当たる箇所に取り付けた加速度計によって作動時の波形を記録し、連続した10個の波形の振幅を計測した平均値である。

測定に用いた振動機は直径が30、40、50および60mmの4種類のインバータ式内部振動機であり、振動数は6,000～18,000vpmの範囲で3,000vpmずつ変化させた5通りとした。



図-4.4 内部振動機の無負荷時に記録した波形の一例

図-4.4 に無負荷時について記録した波形の一例を示し、加速度と振幅の測定結果を表 4.2 に示した。

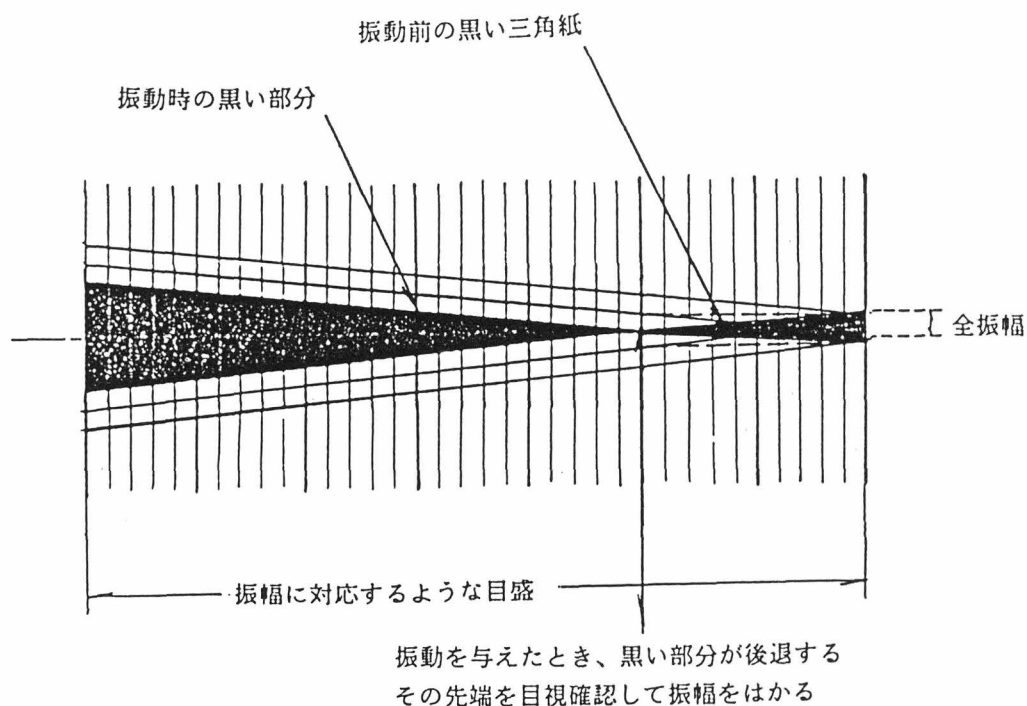


図-4.5 振動機の振幅測定に用いた三角紙

表 4.2 における振幅は三角紙法^{54) 136) 158)}(図-4.5、写真 4.1) を用いて実測した値であって、振動数と加速度から算出した値とほぼ等しいが、三角紙の貼付位置による影響があるため計算値よりやや大きい値が得られている。



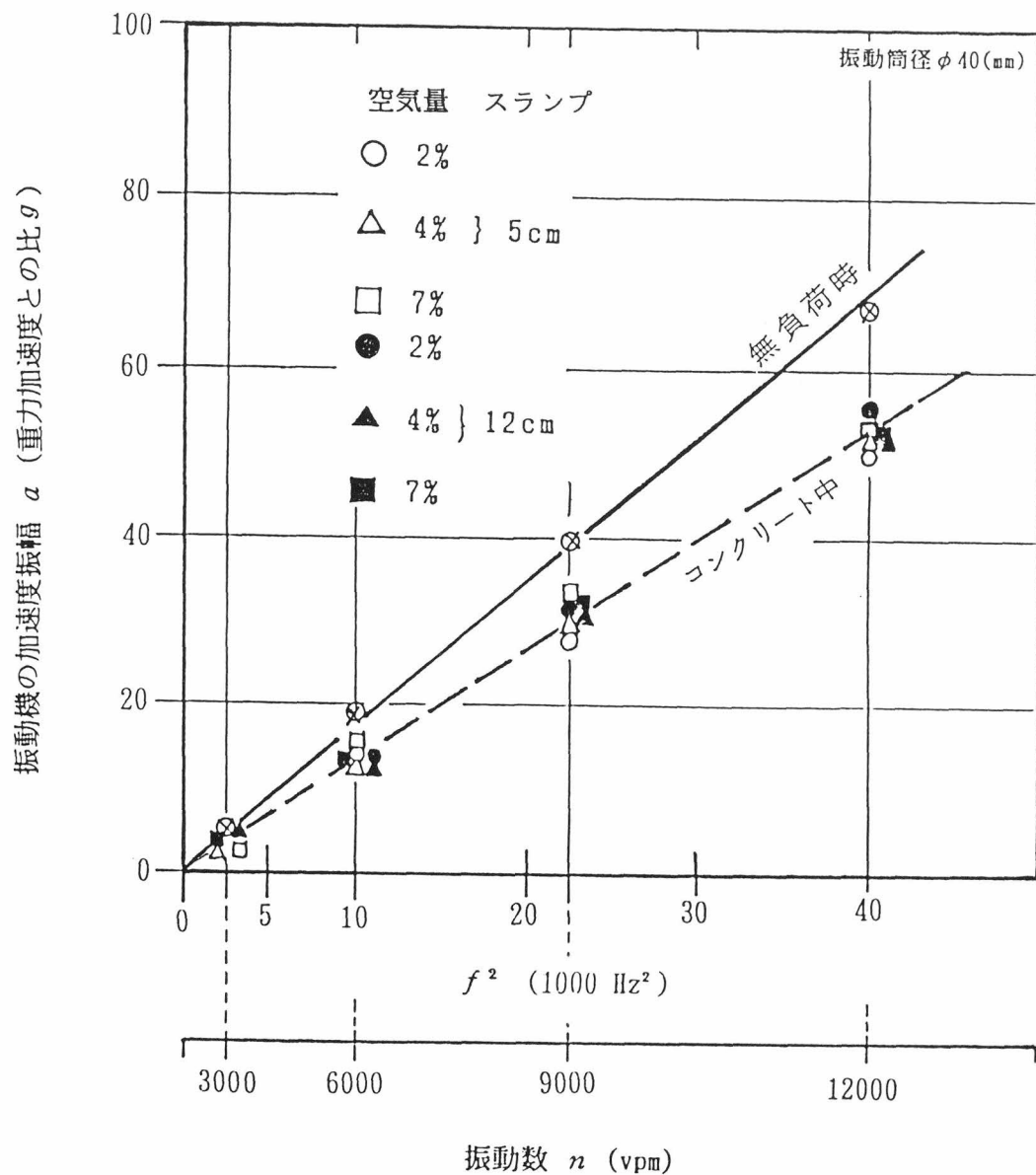
写真 4.1 内部振動機の振幅測定の場合

コンクリートの締固め中における振動機の加速度の測定はコンクリートのスランブを5 cm、12cmの2種類とし、空気量を2 %、4 %、および7 %として行った。コンクリートの配合と強度の関係を表 4.3 に示す。

表 4.3 実験に使用したコンクリートの配合と強度

コンクリートの種類	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブの目盛 (cm)	空気量の目盛 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位水型 W (kg/m³)	圧縮強度	
							7日 (kgf/cm²)	28日 (kgf/cm²)
non AE コンクリート	20	5	2	55.0	46.0	166	188	242
		12			46.5	175	172	228
AE コンクリート	20	5	4	55.0	44.5	146	160	207
		12			45.0	162	151	194
		5	7		43.5	135	138	169
		12			44.0	149	122	156

実験結果を振動数 f の 2 乗と加速度振幅の関係として示したのが図－4.6、図－4.7 および図－4.8 である。



図－4.6 振動機の振動数と加速度振幅との関係（振動機の筒径 $\phi 40\text{mm}$ ）

これらによると、図-4.6 の振動筒径 $\phi 40\text{mm}$ と図-4.8 の $\phi 60\text{mm}$ の無負荷時の加速度振幅 a は、振動数 f の 2 乗と正比例関係にあり、コンクリート中に挿入したときの加速度振幅 a も若干の差は生じているものの加速度振幅 a と振動数 f^2 とが正比例関係にあることがわかる。

一方、図-4.7 の振動筒径が $\phi 50\text{mm}$ の振動機の場合には加速度振幅が 250 Hz までは直線的であるが、コンクリート中にある場合も同じく 200Hz を越えて、振動数が 250Hz \sim 300Hz 付近の高振動になると比例関係からやや外れている。

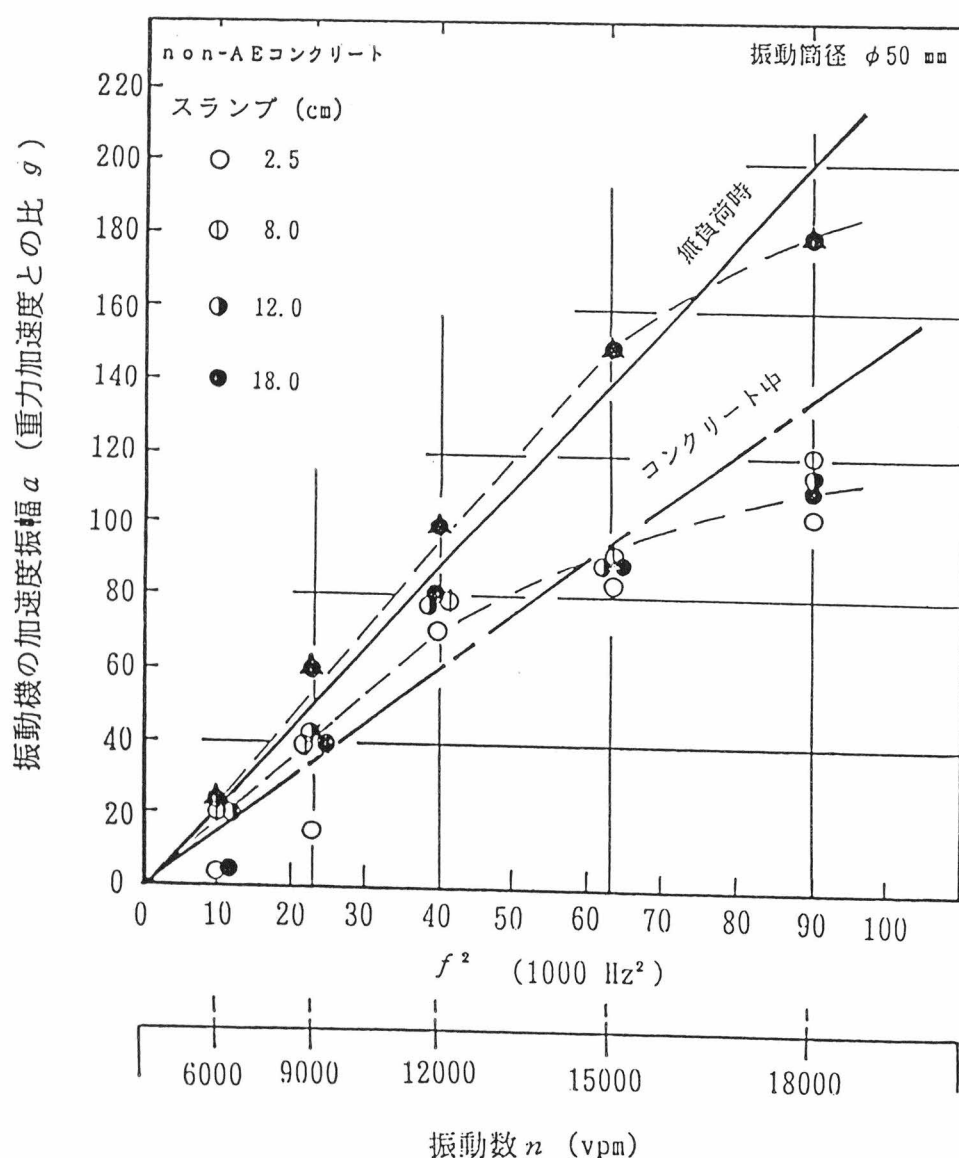


図-4.7 振動機の振動数と加速度振幅との関係 (振動機の筒径 $\phi 50\text{mm}$)

しかし、振動筒径が $\phi 40\text{mm}$ と $\phi 60\text{mm}$ において a と f^2 がほぼ正比例関係にあることから判断すれば、振動筒径 $\phi 50\text{mm}$ を使用した振動機の場合は一時的かあるいは製作上の構造機構によって、電動機の高速回転時にトルク低減現象が生じたものと考えられる。

このように、振動機が無負荷時においても、また、締固め時においても加速度振幅は f^2 とが正比例関係にあることは、振動数が変化しても負荷による加速度の損失率が一定していることを示している。

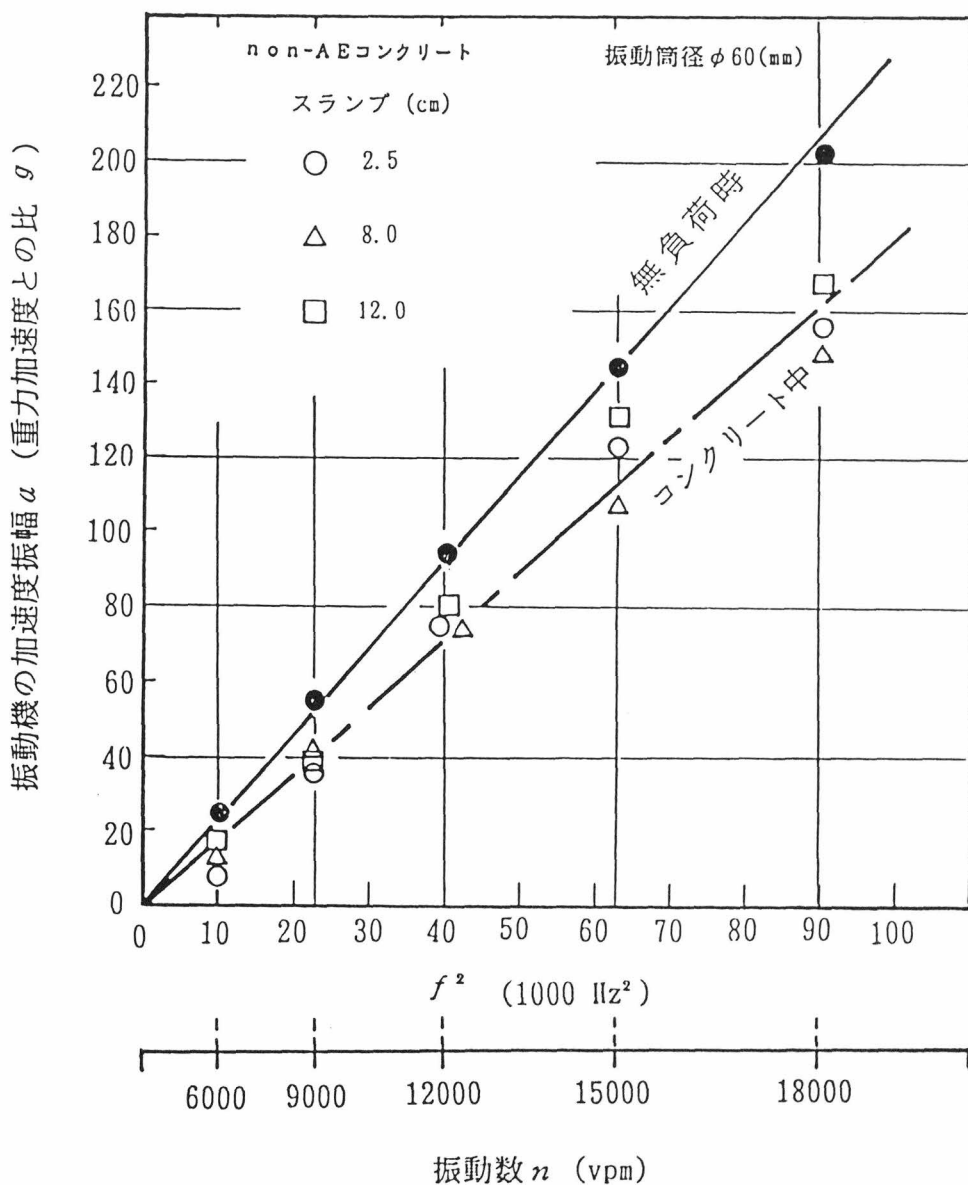


図-4.8 振動機の振動数と加速度振幅との関係 (振動機の筒径 $\phi 60\text{mm}$)

(2) 振動機の振動筒径と加速度振幅との関係

振動機の振幅と振動筒径との関係を示したのが図-4.9 であって、振動筒径が相違すると振動機の振幅は振動筒径に影響することが見出される。振動機の振動数による振幅の差は小さい傾向を示したことは前述したが、振動筒径が $\phi 30\text{mm} \sim \phi 60\text{mm}$ の範囲にある場合の振幅は約 $0.47\text{mm} \sim 0.70\text{mm}$ と振動数による変化に比べてほぼ2倍の変化が生じていることがわかる。このように、振動機の振幅の変化の傾向は、振動数の変化の影響よりも振動筒径の太さによる影響の方が大きいことが明らかになった。

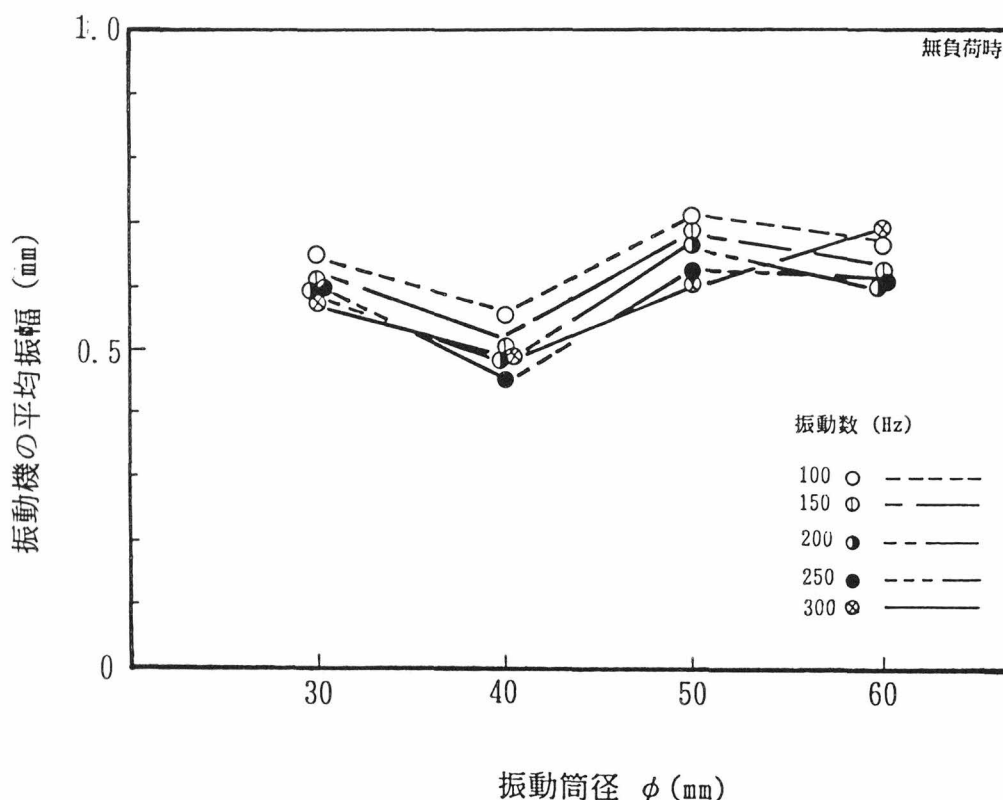


図-4.9 振動機の振動筒の平均振幅

図-4.10 は、表 4.4 に示した無負荷時における振動機の特長から図示した振動数の振動筒表面位置での全振幅との関係を示したものである。振動数が約 $100\text{Hz} \sim 300\text{Hz}$ に変化した場合の振幅は、低速回転においてやや大きくなっているが、振動数の範囲が3倍になっているにも拘わらずその差は小さくなっていて、振動機の構造機構の特性に余り差異がないことをしめしている。このような場合でも、 300Hz を除いた振動数に

においては、振動機の振幅は高速振動になるにしたがってやや減少する傾向にある。しかし、全体の傾向をみると振動数の変化が大きい割には振動機の振幅の変化の値は小さくなっていることがわかる。

表 4.4 振動機の無負荷時の加速度に対する締固め時の加速度振幅比

振動機 の筒径 ϕ (mm)	振動機の加速度振幅 (g)										加速度振幅比				
	無負荷時 $a_v(g)$					コンクリート中 $a_w(g)$									
	6000	9000	12000	15000	18000	6000	9000	12000	15000	18000	6000	9000	12000	15000	18000
30	26	55	97	141	166	14	44	60	88	106	0.54	0.80	0.62	0.62	0.64
40	22	45	78	110	141	16	33	56	81	99	0.73	0.73	0.72	0.74	0.70
50	27	62	108	148	174	22	49	80	96	124	0.81	0.79	0.74	0.65	0.71
60	26	55	96	144	202	21	38	75	104	148	0.81	0.69	0.78	0.72	0.73

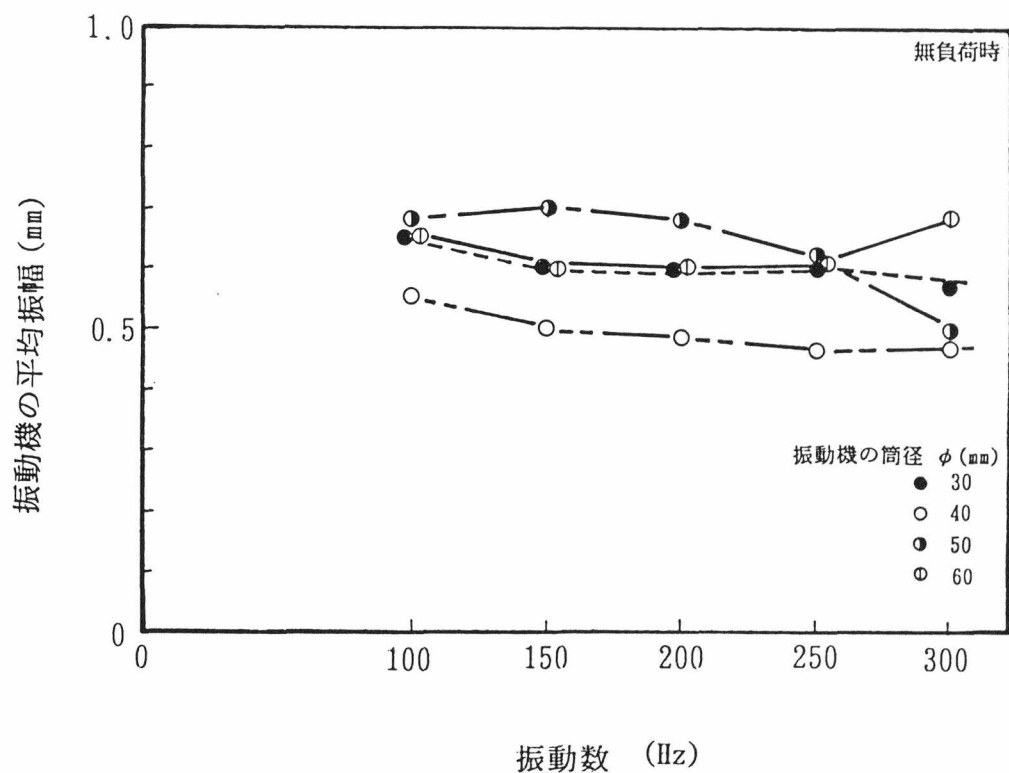


図 - 4.10 振動機の振動数と振幅との関係

このように、振動機の振動加速度振幅は無負荷時とコンクリート中での負荷時においての大きさが変化し、コンクリート中での振動機の加速度振幅は、無負荷時に対して、平均70～80％に減少して作動し、コンクリート中での振動機の加速度振幅の機能は平均2割程度の低下を生じてコンクリート負荷に抵抗して振動締固めの働きを行っていることがわかる。一方、次の(3)で述べるように、振動数は、無荷時とコンクリート中での負荷時において、ほぼ等しく変わらない事が実験的に証明されていることから、振動機の加速度振幅の減衰は、振動部の振幅の減衰によるものと考えてよい。

(3) 無負荷時と締固め時における振動機の振動数と加速度振幅

表 4.5 は、スランプ 5.0cm と 12.0cm で空気量が2.4および7％のコンクリートについて無負荷時と締固め時における振動機の振動数を測定した結果を示したものであり、これを図示したのが図-4.11である。これをみると、コンクリートのスランプおよび空気量にかかわらず振動機の振動数は無負荷時と締固め時で変化がなく、一定であって、コンクリートの負荷抵抗が作用した状態でも振動機の振動数はほとんど影響されないことを示している。

図-4.12は、振動機の振動数が 6,000～18,000vpm の5つの場合について振動機の振動筒径とコンクリート中での加速度振幅との関係について実験結果を図示したものである。なおコンクリートのスランプは 8.0 cm に一定とした。図から明らかなように、振動筒径が大きいほど加速度は大きくなる傾向を示し、特に $\phi 50\text{mm}$, $\phi 60\text{mm}$ で加速度の増大が著しい。また、筒径の影響は振動数が高い場合に顕著である。

したがって、振動数を一定とした場合には、振動機の筒径の太さによる影響があることを考慮して締固め時のコンクリートの性質と振動筒径の適切な選択が必要である。この実験の範囲からは、低速振動および高速振動においても振動筒径の特性を考えれば、 $\phi 50\text{mm}$ および $\phi 60\text{mm}$ の筒径がコンクリート中での損失が小さく適当であると考ええる。

表 4.5 コンクリート中の振動機の振動数 (Hz) 空気量2.0%~7.0%

<div> <div>コンクリートの性質</div> <div>コンクリート・振動機</div> <div>振動数</div> <div>通電時間(秒)</div> </div>			コンクリート					
			スラブ 5(cm)			スラブ 12(cm)		
			空気量 (%)			空気量 (%)		
			2	4	7	2	4	7
12000vpm	10	振動機	192	186	181	197	186	182
		コンクリート	192	186	181	197	186	182
	30	振動機	194	191	187	200	190	182
		コンクリート	194	191	187	200	190	183
9000vpm	10	振動機	148	140	141	150	146	141
		コンクリート	147	140	141	150	146	141
	30	振動機	149	144	143	150	148	143
		コンクリート	149	144	143	150	148	143
6000vpm	10	振動機	98	95	98	95	92	96
		コンクリート	98	95	98	95	92	96
	30	振動機	98	96	99	95	92	96
		コンクリート	98	96	99	95	92	95
3000vpm	10	振動機		47	48			50
		コンクリート		47	48			50
	30	振動機		48	49			51
		コンクリート		48	49			51

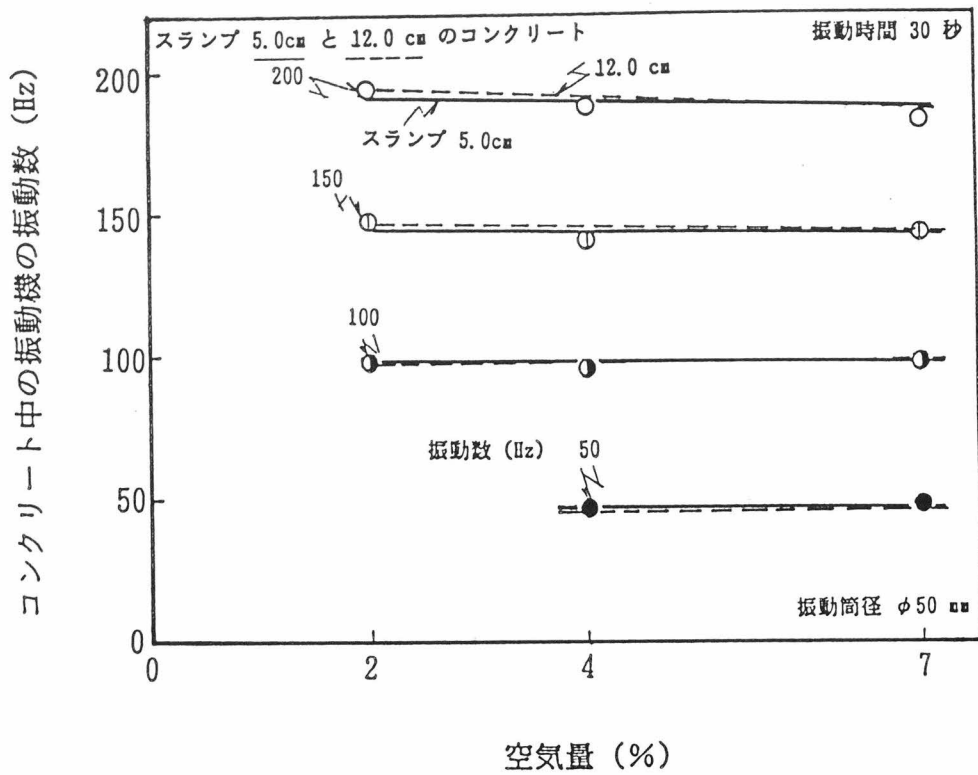


図 4.11 コンクリートの空気量と振動数の関係

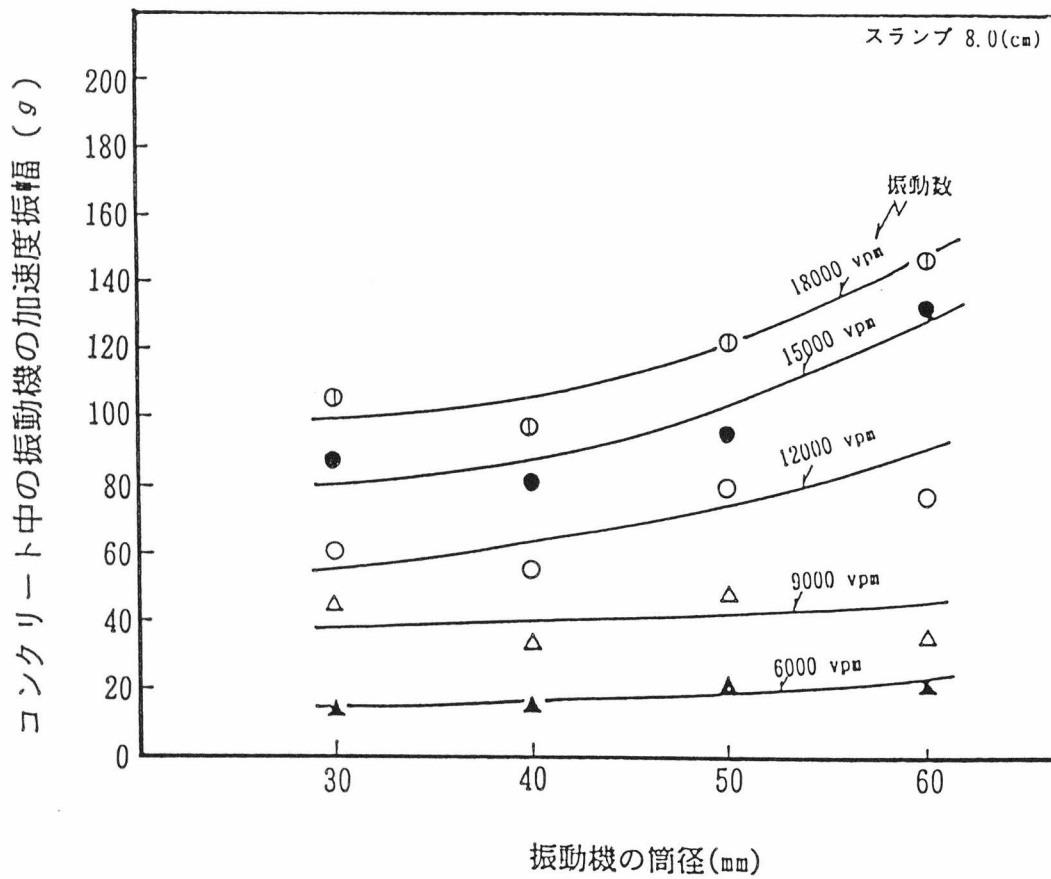


図 4.12 振動機の筒径と加速度振幅との関係

4.2.4 締固め時の負荷による振動機の加速度振幅の低下に影響する要因

コンクリートの施工においては、構造物の種類やその特性によって、コンクリートの性質を適切に選択しなければならないと同時にコンクリートの性質に適した振動機を選定して締固めを実施することが必要である。そこで、締固め中の振動加速度におよぼすコンクリートの性質の影響を調べるために、特にスランプが変化した場合の加速度の変化を図示したものが図-4.13 である。

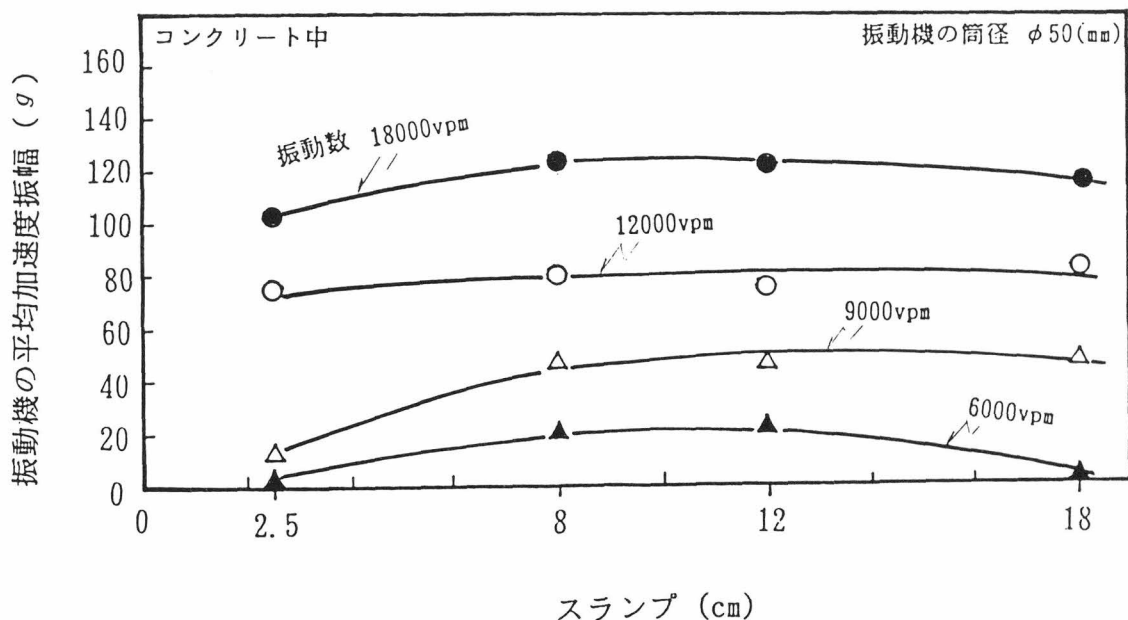


図-4.13 加速度振幅におよぼすスランプの影響

図-4.13 によれば、どの振動数の場合も硬練り、コンクリートのスランプが 2.5cm で振動機の加速度振幅は低下してスランプ 8cm の場合の約 20%~94%となっているが、スランプ 8.0~18.0cm の範囲では、あまり影響しないことがわかる。

図-4.14 および図-4.15 は、振動機を中心からの距離が 50cm の位置でのコンクリート中に埋設した加速度計で測定した加速度振幅と振動数およびコンクリートの性質との関係である。振動数が高くなって振動機の加速度振幅が大きくなると、どのスランプのコンクリートの場合においてもコンクリート中の加速度振幅は高く、特に、振動数が 200Hz のときに加速度振幅の増加が著しい傾向を示している。(図-4.14) しかし、コンクリートの性質が変わると振動機の振動数が一定であっても振動機から 50cm の位置におけるコンクリートの加速度の値に差が生じていることがわかる。(図-4.15)

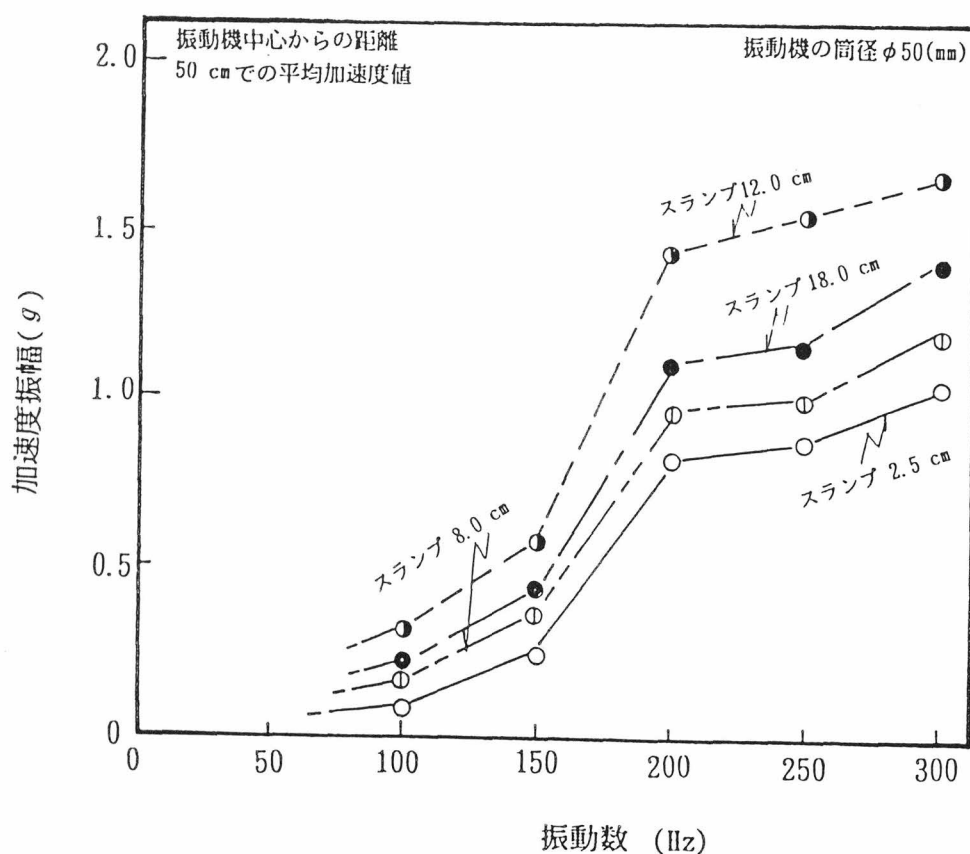


図-4.14 振動数が加速度振幅におよぼす影響

図-4.13 に示されているように、締固め時における振動機の加速度はスランプ 8cm と 12cm で差異がないから、この差は振動機からコンクリートに振動が伝達されてコンクリート中を伝達する過程において生じたものと考えられる。この点に関する研究結果については後の第5章で詳述する。

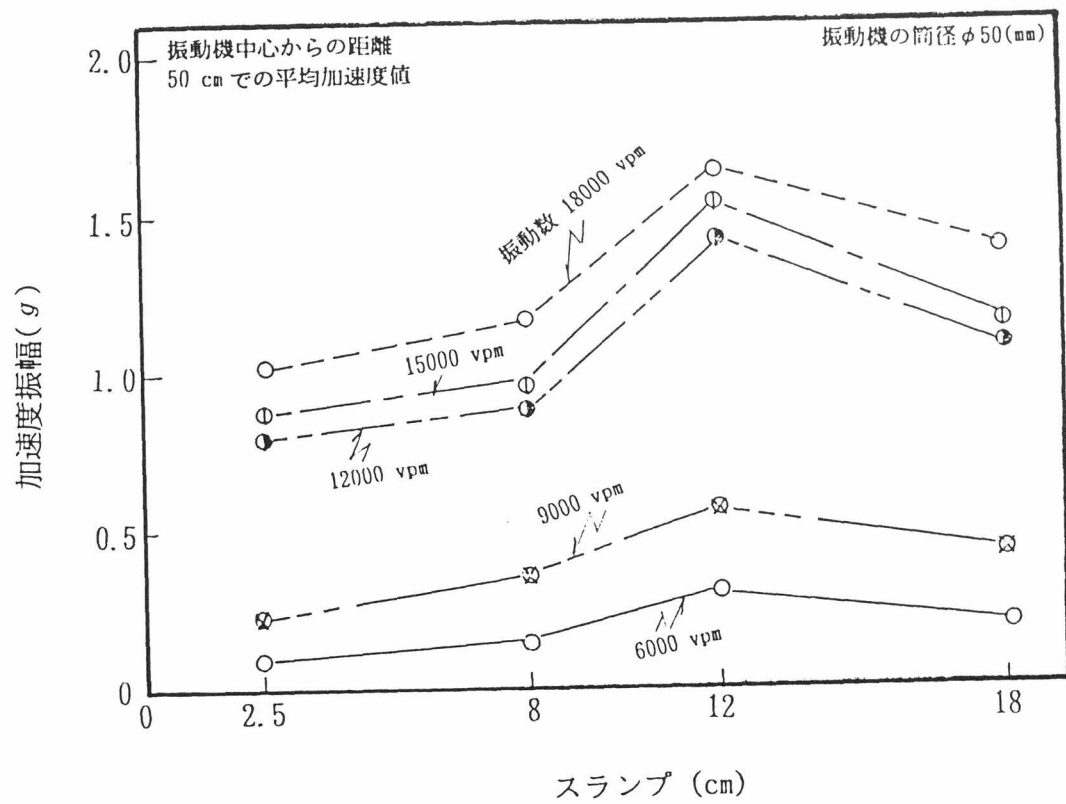


図-4.15 コンクリートの加速度振幅に及ぼすスラブの影響

4.3 振動機からコンクリート中への振動の伝達率と減衰係数の測定方法

4.3.1 伝達率の定義

伝達率とは、一般に2つの物体または物質の境界を通して、ある物理量の授受が行われる場合に用いられる用語であり、物体表面と外界との間の熱伝達率などが、その例である。しかし、コンクリートの振動締固めに関しては振動機からある距離だけ離れた位置で実測したコンクリート中の加速度を振動機の加速度に対する比で表して、これを加速度の伝達率としていることが多い。

これは振動機表面に接したコンクリートの加速度が測定できなかったことに起因するものであるが、第3章における研究によってコンクリート中の任意の点における加速度を表す関数が得られた結果、振動機表面位置におけるコンクリートの加速度を実験と解析によって求めることが可能となった。そこで、著者は、振動の加速度についても伝達率の本来の定義に従い、振動機からコンクリートへ両者の境界で伝達される比率をもって伝達率とすることにした。

すなわち、

R_t : 伝達率

a_o : 振動筒表面の位置におけるコンクリート中の加速度振幅

a_v : コンクリート中で作業している状態での振動機の加速度振幅
において、

$$a_o = R_t a_v$$

である。

4.3.2 伝達率と減衰係数を求める方法

第3章 3.3で述べたように、振動機からコンクリートへの伝達とコンクリート中を伝播する際の減衰を考慮した P 点における振動加速度は、

$$a_{r\theta} = a_0 \sqrt{\frac{d}{2r}} e^{-\beta(r-d/2)} \sin \left\{ 2\pi f t - \frac{2\pi f}{c} \left(r - \frac{d}{2} \right) - \theta \right\}$$

で表される。したがって点 P の加速度振幅は、

$$a_m = a_0 \sqrt{\frac{d}{2r}} e^{-\beta(r-d/2)}$$

であるから、片対数グラフでは、次の直線式で表すことができる。

$$\ln \left(a_m / \sqrt{\frac{d}{2r}} \right) = \ln a_0 - \beta (r - d/2)$$

ここに、

a_m : 振動機中心からの距離 r における加速度振幅

d : 振動機の直径

r : 振動機中心からの距離

a_0 : 振動機表面位置におけるコンクリートの加速度振幅

β : 減衰係数

そこで、実験結果から得られた加速度振幅の場所的变化 a_m を記録紙

から解読し、 $\ln(a_m / \sqrt{d/2r}) = y$ とおいて、 y と $r - d/2$ との関係を表す直線の切片と傾きを求める。すなわち、振動筒表面の位置におけるコンクリートの加速度振幅と減衰係数 β が得られる(図-4.16)。

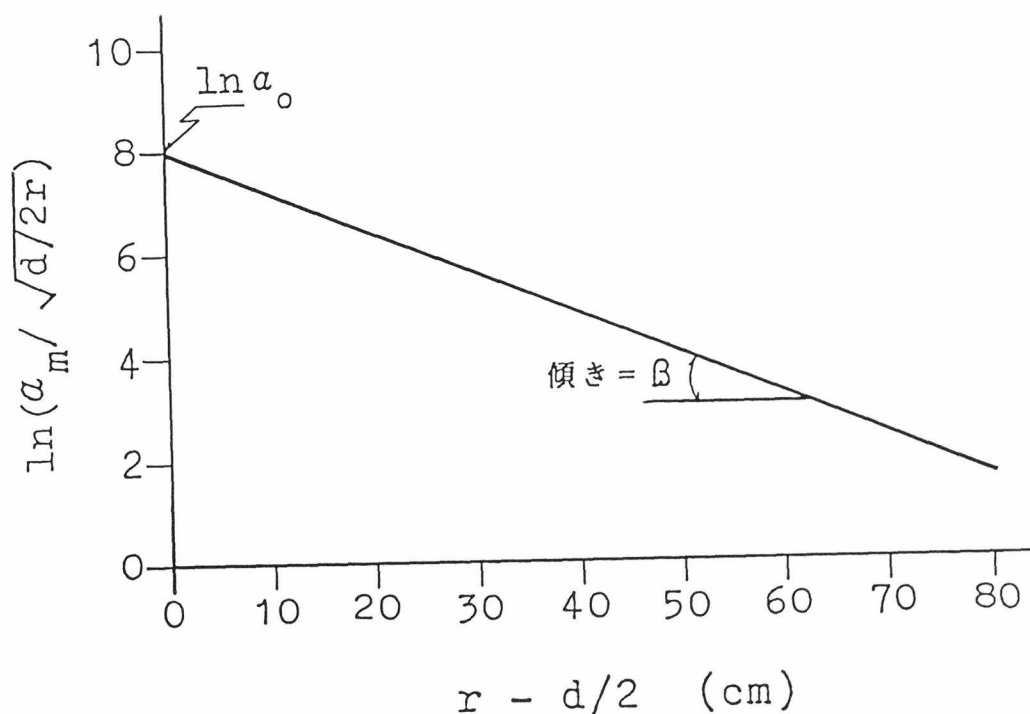


図-4.16 振動伝達と減衰係数の解析方法のモデル

図-4.16 から直線と縦軸との交点は $\ln a_0$ であるから、この値から a_0 すなわち振動筒表面の位置におけるコンクリート中での加速度振幅が求まり、直線の傾きから減衰係数 β を求めることができる。さらに、振動機の振動部自体のコンクリート中での加速度振幅 a_v に対する振動機とコンクリートの界面での加速度振幅 a_0 の比として伝達率を求めることができる。

このことは、通常の振動機を用いた二次元的な実験によってコンクリート中の振動の伝播性状に関係する伝達率 R_t および減衰係数 β の2つの重要なパラメータの値を実験結果からの資料によって求め、これらの値を基礎にコンクリートの性質と振動機の特性和との関係から、締固めによる適合性を論じることが可能であることを意味している。

4.4 本章のまとめ

内部振動機の振動特性としての無負荷時での加速度振幅の値は、振動機自身の機械的特性を示す重要な要因であり、コンクリート中に挿入した状態での加速度振幅の損失低下の程度は、振動機とコンクリートとの双方の関係が適切な締固め性状であるか否かを判断するための重要な資料となる。

これらの振動特性は、無負荷の状態での加速度振幅と振動数の2乗とが正比例関係にあり、また、コンクリート中に挿入したときの加速度振幅と振動数の2乗とがほぼ正比例関係にあることが明らかになった。このように、振動機が無負荷時においても、また、締固め時においても加速度振幅は、振動数の2乗と正比例関係にあることは振動機の振動数が変化しても締固め時の負荷による加速度の損失率が一定していることを意味しているものとする。

振動機からコンクリート中への振動の伝達率および伝播中における減衰係数について考え方の定義を行い、伝達率と減衰係数についての解析方法を提案した。さらに、振動機からコンクリート中への伝達と減衰を実験結果の資料を用いて計算することを可能にした。

第 5 章

フレッシュコンクリートの諸性質と 振動の伝達・伝播特性との関係

第5章 フレッシュコンクリートの諸性質と振動の伝達、伝播特性との関係

5.1 振動の伝達、伝播に関わる特性を表すパラメータ

(1) 岩崎の解析

岩崎¹⁵⁷⁾は、振動機から伝播する波動の液状化作用の評価方法についての解析を行っていて、その結果は、本章の研究に有用と考えられるので、これについて、まず Review を行った。以下にその概略を記す。

図-5.1 のように振動機を中心位置に原点をとり、コンクリート中の任意の点 $P(r, \theta)$ に正方形素片 $PQRS$ を考える。

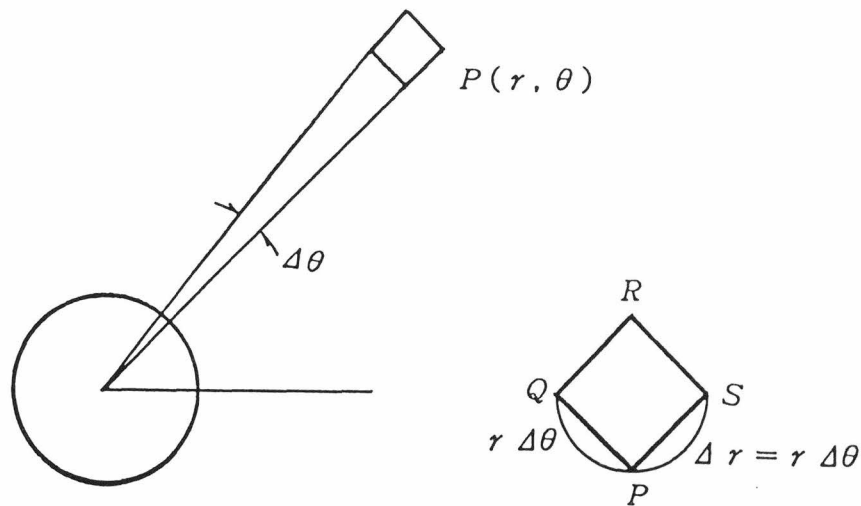


図- 5.1

ある時刻において、点 P の変位が $\psi(r, \theta)$ であったとすると、 Q , R , S 各点の変位は、それぞれ

$$Q: \psi + \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \Delta \theta$$

$$R: \psi + \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \Delta \theta + \frac{\partial \psi}{\partial r} \Delta r$$

$$S: \psi + \frac{\partial \psi}{\partial r} \Delta r$$

である。

したがって、点 P, Q, R, S の変位後の位置は、図 5.2 (a) の点 P', Q', R', S' になるが、四辺形 $P'Q'R'S'$ を平行移動して P' を P に一致させたものを $P''Q''R''S''$ とすれば、 $PQRS$ と $P''Q''R''S''$ は図 (b) で表される。すなわち、正方形 $PQRS$ は、伸縮変形とせん断変形によって平行四辺形になり、変形における伸縮ひずみ ε とせん断ひずみ γ とすると、

$$\varepsilon = \frac{SS''}{PS} = \frac{SS' - PP'}{PS} = \frac{\{\psi + (\partial\psi/\partial r)\Delta r\} - \phi}{\Delta r} = \frac{\partial\psi}{\partial r}$$

$$\gamma = \frac{QQ''}{PQ} = \frac{QQ' - PP'}{PQ} = \frac{\{\psi + (\partial\psi/\partial\theta)\Delta\theta\} - \phi}{r\Delta\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial\psi}{\partial\theta}$$

である。

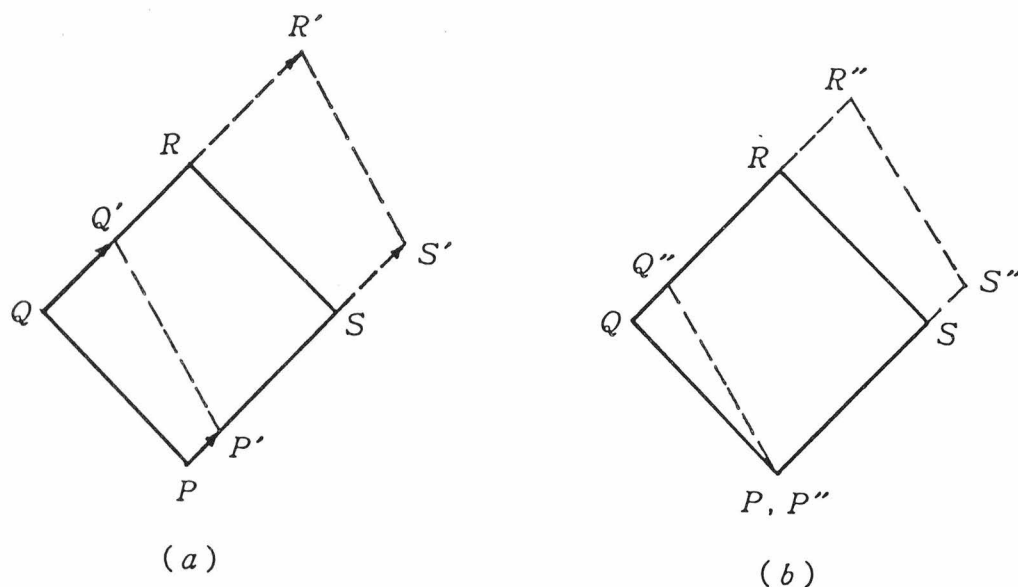


図- 5.2

いま、図-5.3 に示すように、長方形の頂点 R が x 軸方向に Δx だけ変位したとき、対角線の長さ l が $l + \Delta l$ になったとすると、

$$l = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$\Delta l = \frac{\partial l}{\partial x} \Delta x = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \Delta x$$

l の変化率は、

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{x}{x^2 + y^2} \Delta x$$

この式において、 x, y および Δx は、 $x = \Delta r$, $y = r \Delta \theta = \Delta r$

$$\begin{aligned} \Delta x = RR'' &= RR' - PP' = \left(\phi + \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \Delta \theta + \frac{\partial \phi}{\partial r} \Delta r \right) - \phi \\ &= \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \Delta \theta + \frac{\partial \phi}{\partial r} \Delta r = \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} + \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) \Delta r \end{aligned}$$

であるから、

$$\begin{aligned} \frac{\Delta l}{l} &= \frac{\Delta r}{(\Delta r)^2 + (\Delta r)^2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} + \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) \Delta r \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} + \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) \Delta r = \frac{1}{2} (r + \varepsilon) \end{aligned}$$

となる。

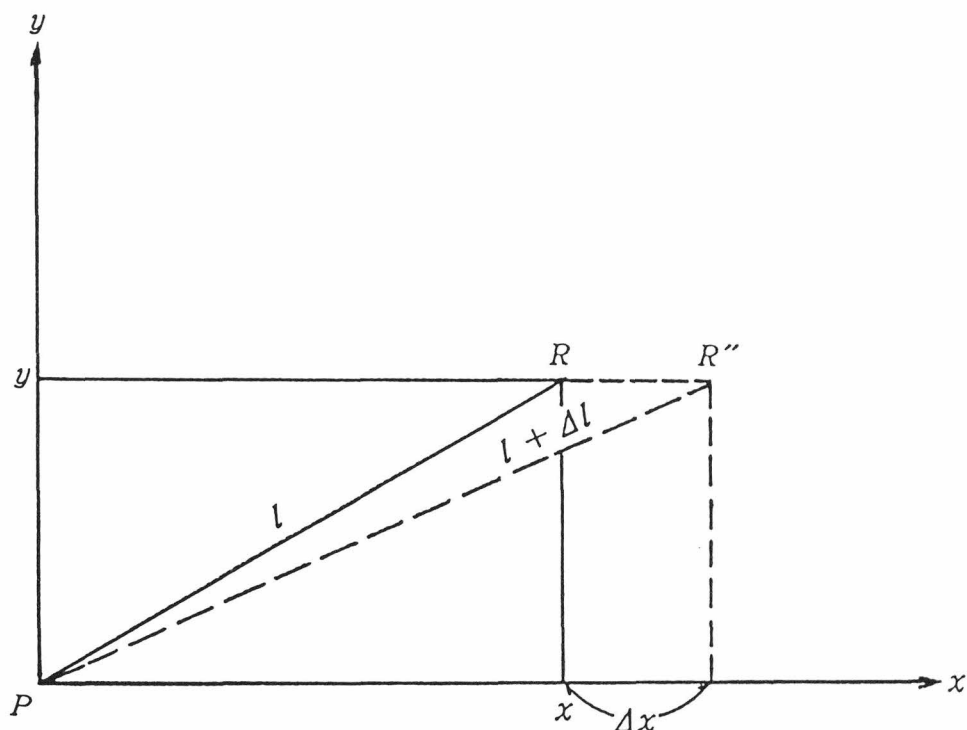


図- 5.3

振動がフレッシュコンクリートに及ぼす液状化作用を L とし、これを正方形素片の対角線ひずみ $\Delta l / l$ と単位時間にひずみの生じる回数、すなわち周波数 f との積で評価することにすれば、

$$L = f \frac{\Delta l}{l} = \frac{\omega}{4\pi} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} + \frac{\partial \phi}{\partial r} \right)$$

となる。

一方、任意の点 P における変位は、次式で表される波動関数 ϕ_P 、として求められている。

$$\phi_P = \phi_o \sqrt{R_v / r} e^{-\beta(r-R_v)} \sin \{ \omega t - k(r-R_v) - \theta \}$$

ここに、 ϕ_P : P 点における変位

ϕ_o : 最大変位 (cm)

R_v : 振動機の半径 (cm)

r : 振動機の中心からの距離 (cm)

k : 波数 ($2\pi f / c$)

c : 波の速さ (cm/s)

t : 振動時間 (s)

β : 減衰係数 (1/cm)

この式は、渦巻き状の波面をもつ波動を表す¹⁵⁵⁾。 ϕ にこの式を適用すると、

$$\phi = A \sin \phi$$

ここに、

$$A = \phi_o \sqrt{R_v / r} e^{-\beta(r-R_v)}$$

$$\phi = \omega t - k(r-R_v) - \theta, \quad k = \omega / c = 2\pi f / c$$

次に、

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (A \sin \phi) = -\frac{A}{r} \cos \phi$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial r} = \left(\frac{\partial A}{\partial r} \right) \sin \phi + A \frac{\partial}{\partial r} (\sin \phi)$$

$$= -A \left(\beta + \frac{1}{2r} \right) \sin \phi - A k \cos \phi$$

したがって、

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} + \frac{\partial \phi}{\partial r} = -A \left\{ \left(k + \frac{1}{r} \right) \cos \phi + \left(\beta + \frac{1}{2r} \right) \sin \phi \right\}$$

$$= -A L_r \sin(\phi + \alpha)$$

ただし、

$$L_r = \sqrt{\left(k + \frac{1}{r}\right)^2 + \left(\beta + \frac{1}{2r}\right)^2}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{2(kr + 1)}{2\beta r + 1}$$

となり、 L は次式となる。

$$L = -\frac{\omega A}{4\pi} L_r \sin(\phi + \alpha)$$

L の最大値によって液状化作用の強さを表すこととし、これを液状化作用値 $L_q (s^{-1})$ とよぶことにすれば、

$$L_q = -\frac{Af}{2} L_r = -\frac{\omega A}{4\pi} L_r$$

加速度振幅を a 、重力加速度 g に対する比で表わした加速度振幅を a_G とすると、

$$L_q = \frac{a}{4\pi\omega} L_r = \frac{g a_G}{4\pi\omega} L_r$$

$$L_r = \sqrt{\left(k + \frac{1}{r}\right)^2 + \left(\beta + \frac{1}{2r}\right)^2}$$

である。

このように、振動機中心からの距離が r の位置における振動の液状化作用値 L_q は、その点での振動の加速度 a 、波速 c と減衰係数 β から計算される。

なお、振動機中心からの距離が異なる数箇所で加速度が測定されている場合には、振動機とコンクリートの接触面におけるコンクリートの加速度 a_0 と減衰係数 β は容易に求められるから、これを用いて、任意の位置における液状化作用値を次式で計算することができる。

$$L_q = \frac{a L_r}{4 \pi \omega} \sqrt{\frac{R_v}{r}} e^{-\beta(r-Rv)}$$

$$= \frac{a_o}{4 \pi \omega} \sqrt{\frac{R_v}{r} \left\{ \left(k + \frac{1}{r} \right)^2 + \left(\beta + \frac{1}{2r} \right)^2 \right\}} e^{-\beta(r-Rv)}$$

さらに、振動機からの距離が大きく

$$k \gg \frac{1}{r}, \quad k \gg \beta + \frac{1}{2r}$$

とみなせるときは $L_r \cong k$ となるので、

$$L_q = \frac{a}{4 \pi \omega} L_r = \frac{g a_G}{4 \pi \omega} L_r$$

この式は、

$$L_q = \frac{a k}{4 \pi \omega} = \frac{a}{4 \pi c}$$

となり、液状化作用値は加速度振幅に比例し、振動の伝播速度に反比例することになる。

一方、 ϕ が $\phi = A \sin \omega \left(t - \frac{r}{c} \right)$ のように表される平面波あるいは円筒波の場合には、 $\Delta l / l$ は伸縮ひずみ成分だけになるから、

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{2} \frac{\partial \phi}{\partial r} = - \frac{\omega A}{2c} \cos \omega \left(t - \frac{r}{c} \right)$$

$$\therefore L = f \frac{\Delta l}{l} = - \frac{\omega^2 A}{4 \pi c} \cos \omega \left(t - \frac{r}{c} \right)$$

$$= \frac{a}{4 \pi c} \cos \omega \left(t - \frac{r}{c} \right)$$

したがって、液状化作用値は、

$$L_q = \frac{a}{4 \pi c} \text{ となって、 } L_q = \frac{a k}{4 \pi \omega} = \frac{a}{4 \pi c} \text{ 式と一致する。}$$

これは、振動機からの距離が大きくなると波面が平面波に近づくことによるものである。

(2) 本研究で用いたパラメータ

振動機によるコンクリートの振動締固めは、基本的には振動によるセメントペーストの液状化と自重によるコンクリートの液状化および沈下と考えることができる。

実際のコンクリートの締固め施工においては、使用される内部振動機とコンクリートの諸性質の双方の関係が適切であって、振動によってコンクリート中に液状化作用が生起する状態にあることが不可欠であると考えられる。振動機を用いて締固めても全く振動に対してコンクリートの性質が液状化作用を生じ得ない状態にある場合には締固めが不可能となる。

前述の L_q の式において、加速度振幅 a は、

$$\begin{aligned} a &= g a_0 \\ &= g R_t a_v \sqrt{\frac{R_v}{r}} e^{-\beta(r-R_v)} \end{aligned}$$

ここに、

g : 重力加速度 (cm/s^2)

R_v : 振動筒の半径 (cm)

R_t : 振動機表面からコンクリートへの加速度の伝達率

a_v : 振動機の加速度振幅 (g)

であり、この式に含まれる伝達率 R_t 、減衰係数 β および L_q の式中の波速 c は何れも著者の行ったスラブ状試験体による実験結果から求めることができる特性値である。

そこで、このような締固めに対するコンクリートの性質と振動機の特性などを考慮に入れて、これまで解析された振動による、液状化作用値

$L_q = \frac{a}{4\pi c}$ の式を採用して、フレッシュコンクリートの諸性質と締固め

に対する性質との関係について検討することにした。

5.2 実験結果から伝達率と減衰係数を求める方法

第3章で示した点 P における振動 $a_{r\theta}$ の式(3.23)から

$$a_{r\theta} = a_o \sqrt{\frac{d}{2r}} e^{-\beta(r-d/2)} \sin \left\{ \omega t - \frac{\omega}{c} \left(r - \frac{d}{2} \right) - \theta \right\}$$

で表される点 P の加速度振幅 a_m (加速度振幅の場所的变化)は、

$$a_m = a_o \sqrt{\frac{d}{2r}} e^{-\beta(r-d/2)}$$

であるから、次の直線式が得られる。(4.3.2 参照)

$$\ln \left(a_m / \sqrt{\frac{d}{2r}} \right) = \ln a_o - \beta \left(r - \frac{d}{2} \right)$$

そこで、コンクリート中に埋込んだ加速度計 20(g) と振動機の回転重錘部の中心にあたる筒表面振動部に取付けた加速度計 200(g)および 500(g) を用いて振動実験を行い、電磁オシログラフを用いて検出記録された加速度振幅を記録紙上の波形から求めて、加速度振幅の5測点を計算し、その平均を実験値として用いた。記録紙の送り速度は 1.0 m/s とした。

この実験から得られた加速度振幅の値を用いて、 $\ln(a_m / \sqrt{d/2r}) = y$ において、 $r - d/2$ と y の関係を表す直線と縦軸 (y 軸)との交点は $\ln a_o$ である。この値から a_o 、すなわち、振動筒表面で、位置におけるコンクリートの加速度振幅とその直線の頂きから減衰係数 β が得られ、さらに、振動機の振動部自体の加速度振幅 a_v にたいする a_o との比として伝達率 $R_t = a_o / a_v$ が求められる。

5.3 伝達率と減衰係数に関する実験結果

5.3.1 著者の実験結果

振動機の加速度振幅と伝達率との関係については、振動数と振動機の筒径を一定として変位振幅を変化させた場合と変位振幅と振動機の筒径を一定として振動数を変化させた場合についての実験が必要であると考えられるので、振動機の特性を考慮にいて、振動数と振動部の振動筒径の直径を変えて、既製品として市販されている振動機を用いて実験することが、より現実的であると考え、表 5.1 のようなコンクリートの性質の組合わせを用いて、伝達率や減衰係数を求めるためのスラブによる振動実験を行って検討した。実験方法については既に第 4 章に詳述してあるので省略する。

表 5.1 コンクリートの性質

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スラブ の厚さ (cm)	空気量 の目標 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
20	2.5	2.0	55.0	46.0	162	295	867	1026
	8.0				171	311	850	1006
	12.0				177	322	837	993
	18.0				187	340	819	969

表 5.2. (a)振動機筒表面位置でのコンクリート中の加速度振幅の経時変化 $a_0 (g)$

コン クリ ト 種 類	ス ラ ブ (cm)	振 動 数 (vpm)	筒 径 ϕ (mm)	振動機表面位置でのコンクリートの加速度振幅 $a_0 (g)$							
				振動時間 (秒)							
				5	10	15	20	25	30	60	平均値
non-AEコンクリート	2.5	18000	30	17.65	26.42	23.36	23.86	28.59	26.31	13.76	24.76
			40	28.76	29.96	28.05	30.60	29.58	24.51	29.64	28.73
			50	24.75	25.18	29.52	29.14	28.10	20.57	22.60	25.70
			60	35.81	39.37	48.09	48.42	47.92	42.73	38.98	43.05
		15000	30	23.27	23.50	21.50	23.06	23.08	20.35	22.22	22.43
			40	27.85	27.49	30.17	31.85	32.95	31.79	29.34	30.21
			50	56.32	49.55	44.57	43.60	47.66	37.26	41.35	45.76
			60	39.65	34.50	33.65	36.31	38.28	39.37	38.51	37.18
		12000	30	14.72	15.55	16.89	17.99	17.46	18.27	17.85	16.96
			40	17.10	13.61	12.00	15.94	14.69	13.63	12.63	14.23
			50	19.24	17.83	16.66	16.64	16.48	16.48	15.85	17.03
			60	23.17	25.25	19.93	22.83	20.35	20.12	18.32	21.42
		9000	30	8.13	8.18	7.44	6.70	6.81	6.97	6.27	7.21
			40	13.14	9.71	9.66	9.62	10.55	10.41	12.19	10.75
			50	8.22	7.71	7.19	7.13	6.55	6.59	6.29	7.08
			60	13.65	14.18	12.99	12.34	13.16	13.46	13.52	13.33
		6000	30	2.83	3.74	3.74	3.74	3.74	3.74	3.74	3.61
			40	4.53	4.53	4.86	4.86	4.86	4.86	4.96	4.78
			50	5.35	4.15	4.15	4.15	4.15	4.60	4.51	4.44
			60	2.86	3.10	3.12	3.12	3.09	2.89	2.91	3.03
	8.0	18000	30	12.43	12.24	15.50	15.30	16.40	16.66	16.18	14.96
			40	17.15	19.36	19.81	19.95	20.76	20.80	20.29	19.73
			50	35.55	36.63	38.82	34.43	35.09	33.31	34.88	35.53
			60	30.97	29.87	31.75	32.14	34.09	28.73	33.78	31.62
		15000	30	16.59	16.33	14.45	15.38	14.57	15.66	15.23	15.46
			40	17.74	17.98	18.54	21.14	20.88	18.12	19.71	19.16
			50	27.99	28.88	30.11	30.05	30.11	29.93	28.90	29.42
			60	23.59	27.69	26.05	26.84	27.03	27.41	28.65	26.75
		12000	30	9.94	7.27	6.86	6.78	6.65	6.86	6.88	7.32
			40	14.44	14.17	14.56	14.73	13.22	14.72	14.31	14.31
			50	23.74	22.81	22.04	22.31	23.03	22.92	22.60	22.78
			60	19.30	22.07	22.24	23.64	24.12	21.39	21.33	22.01
		9000	30	3.21	3.25	3.14	3.20	3.21	3.48	3.56	3.30
			40	6.35	6.44	6.46	6.32	5.94	6.51	7.15	6.45
			50	16.81	14.92	14.79	13.75	12.39	12.91	13.55	14.16
			60	11.31	12.13	11.61	12.21	12.42	12.64	12.96	12.18
		6000	30	2.37	2.36	2.40	2.59	2.39	2.81	2.58	2.50
			40	4.35	4.07	3.50	4.07	4.07	4.40	4.33	4.11
			50	7.22	7.68	7.04	8.22	6.55	7.11	8.54	7.48
			60	6.32	5.70	5.92	7.46	7.71	7.83	6.66	6.80

表 5.2. (b) 振動機筒表面位置でのコンクリート中の加速度振幅の経時変化 a_0 (g)

コン クリ ー ト 種 類	ス ラ ブ (cm)	振 動 数 (vpm)	筒 径 ϕ (mm)	振動機表面位置でのコンクリートの加速度振幅 a_0 (g)							
				振動時間 (秒)							平均値
				5	10	15	20	25	30	60	
non-AEコンクリート	12.0	18000	30	14.40	15.52	15.00	14.53	14.85	14.82	15.72	14.98
			40	25.43	25.64	24.73	22.81	21.16	23.59	23.62	23.85
			50	17.48	18.08	18.07	20.21	20.01	19.77	18.62	18.89
			60	22.69	23.59	24.24	21.93	23.29	22.97	22.76	23.07
		15000	30	14.00	14.07	14.06	13.48	14.79	14.07	13.65	14.02
			40	13.75	12.17	12.39	12.42	12.62	12.48	11.43	12.47
			50	20.31	17.90	18.23	18.77	19.11	19.55	20.74	19.23
			60	17.29	19.81	21.24	19.30	19.79	19.93	19.75	19.59
		12000	30	8.27	8.26	8.54	6.97	8.63	8.71	8.59	8.28
			40	12.12	11.60	12.77	12.96	13.21	12.83	12.77	12.61
			50	12.73	13.32	12.94	11.91	12.79	14.73	14.63	13.29
			60	19.41	18.12	19.71	19.95	19.75	19.26	19.26	19.35
		9000	30	3.84	3.84	3.84	3.84	3.84	3.84	4.25	4.05
			40	2.98	2.98	2.98	2.98	2.98	2.98	2.98	2.98
			50	5.10	4.98	5.06	5.17	5.44	5.68	5.69	5.30
			60	5.98	5.81	5.51	5.44	5.44	5.44	5.30	5.56
		6000	30	1.02	1.27	1.07	1.34	1.46	1.40	1.48	1.29
			40	1.10	1.16	1.17	1.20	1.30	1.13	1.09	1.16
			50	2.47	2.56	2.46	2.43	2.41	2.61	2.49	2.49
			60	2.50	2.50	2.57	2.70	2.40	2.55	2.69	2.56
	18.0	18000	30	5.85	5.08	5.13	4.90	4.82	4.36	4.51	4.95
			40	3.73	3.98	3.57	3.00	3.29	3.80	2.99	3.48
			50	7.18	6.87	6.99	7.95	7.49	7.79	8.93	7.60
			60	7.46	6.22	6.28	5.88	6.33	6.45	6.14	6.19
		15000	30	4.66	4.54	4.37	4.19	3.89	4.14	4.85	4.37
			40	18.47	16.05	18.16	19.95	16.84	16.54	17.03	17.58
			50	22.81	23.64	25.71	19.11	22.15	18.80	17.48	21.39
			60	13.52	16.10	16.06	16.43	16.00	16.20	16.43	15.82
		12000	30	3.06	3.06	3.27	3.05	2.89	2.94	2.94	3.03
			40	7.42	5.71	5.63	5.48	5.20	5.23	5.56	5.75
			50	12.37	11.44	11.21	10.98	11.00	10.83	10.91	11.25
			60	7.21	8.90	8.71	9.15	9.02	9.11	9.31	8.77
		9000	30	2.22	2.19	2.04	1.91	1.91	2.09	2.11	2.07
			40	2.93	2.73	2.51	2.49	2.51	2.51	2.90	2.65
			50	2.85	2.70	2.31	2.07	2.69	2.46	2.03	2.47
			60	2.48	2.59	2.78	2.56	2.28	2.47	2.64	2.54
		6000	30	—	—	—	—	—	—	—	—
			40	—	—	—	—	—	—	—	—
			50	—	—	—	—	—	—	—	—
			60	1.93	2.08	1.94	2.01	2.19	2.17	2.47	2.11

表 5.2. (c)振動機筒表面位置でのコンクリート中の加速度振幅の経時変化 $a_0 (g)$

コンクリート 種類	スラブ (cm)	振動数 (vpm)	筒径 ϕ (mm)	振動機表面位置でのコンクリートの加速度振幅 $a_0 (g)$							
				振動時間 (秒)							
				5	10	15	20	25	30	60	平均値
A Eコンクリート	8.0	12000	30	25.28	25.18	24.43	27.17	20.74	21.69	21.65	23.73
			40	30.32	26.68	21.71	22.56	26.18	23.71	25.58	24.74
			50	43.26	46.55	46.94	45.64	46.78	50.72	46.03	46.56
			60	53.62	48.57	47.89	47.28	45.70	46.02	48.81	48.27
		9000	30	10.07	10.74	10.77	10.74	10.65	11.69	10.50	10.74
			40	17.41	17.90	17.89	18.14	18.62	18.69	18.90	18.22
			50	26.29	25.48	26.18	25.23	28.73	27.58	27.47	26.71
			60	25.23	22.99	24.98	24.93	25.05	25.66	25.20	24.86
	12.0	12000	30	16.91	16.23	16.12	17.05	15.99	15.86	12.77	15.85
			40	34.09	32.59	28.42	26.18	24.24	24.58	24.63	27.82
			50	41.93	36.89	36.16	45.02	36.60	35.91	38.59	38.73
			60	46.25	44.61	40.04	37.94	36.27	36.93	36.02	39.72
		9000	30	9.20	9.19	8.83	8.25	8.22	8.50	7.55	8.53
			40	24.07	23.24	22.65	22.62	20.47	20.13	19.09	21.75
			50	22.71	22.40	19.53	22.15	23.34	21.76	21.24	21.88
			60	30.69	28.59	27.99	29.34	30.24	27.11	27.36	28.76

表 5.3(a) 伝達率の経時的变化 R_t (%)

コンクリート種類	スラブ (cm)	振動数 (vpm)	筒径 ϕ (mm)	伝達率の経時的变化 R_t (%)							
				振動時間 (秒)							
				5	10	15	20	25	30	60	平均値
non-AEコンクリート	2.5	18000	30	20.13	30.13	26.64	27.21	32.60	30.00	15.69	28.76
			40	23.39	24.37	22.81	24.89	24.06	19.93	24.11	23.37
			50	24.18	24.60	28.84	28.47	27.92	20.10	22.08	25.11
			60	22.78	25.04	30.59	30.80	30.48	27.18	24.79	27.38
		15000	30	25.96	26.22	23.98	25.73	25.75	22.70	24.79	25.02
			40	25.26	24.93	27.37	28.89	29.89	28.83	26.61	27.40
			50	38.73	34.08	30.65	29.99	32.78	25.03	28.44	31.15
			60	32.07	27.91	27.22	29.38	30.97	31.85	31.16	30.08
		12000	30	19.65	20.76	22.54	24.01	23.30	24.39	23.83	22.78
			40	28.29	22.51	19.85	26.37	24.30	22.55	20.89	23.54
			50	25.01	23.23	21.70	21.68	21.47	21.47	20.65	22.18
			60	30.30	33.02	26.07	29.86	26.62	26.31	23.96	28.01
		9000	30	41.40	41.65	37.88	34.11	34.67	35.49	31.92	36.71
			40	53.26	39.36	39.16	39.00	42.76	42.20	49.41	43.58
			50	46.44	43.56	40.62	40.28	37.00	37.23	35.03	40.00
			60	38.48	39.92	36.57	34.79	37.05	37.89	38.06	37.53
		6000	30	45.06	59.55	59.55	59.55	59.55	59.55	59.55	57.48
			40	60.64	60.64	65.06	65.06	65.06	65.06	66.40	63.99
			50	64.15	49.76	49.70	49.76	49.76	55.16	54.08	53.23
			60	37.78	40.95	41.12	41.12	40.82	38.18	38.44	40.03
	8.0	18000	30	11.78	11.60	14.69	14.50	15.54	15.79	15.33	14.18
			40	17.39	19.63	20.09	20.23	21.05	21.09	20.57	20.01
			50	28.06	29.47	31.23	27.70	28.23	26.80	28.06	28.58
			60	20.97	20.22	21.49	21.76	23.08	19.45	22.87	21.41
		15000	30	18.95	18.65	16.51	17.57	16.64	17.89	17.40	17.66
			40	21.86	22.16	22.85	26.06	25.73	22.33	24.29	23.61
			50	24.86	25.65	26.74	26.69	26.74	26.58	25.67	26.13
			60	17.57	20.62	19.40	19.99	20.13	20.42	21.34	19.92
		12000	30	16.53	12.09	11.41	11.27	11.06	11.41	11.44	12.17
			40	25.60	25.12	25.81	26.11	23.43	26.09	25.37	25.37
			50	29.58	28.42	27.46	27.80	28.70	28.56	28.16	28.38
			60	24.57	28.01	28.32	30.10	30.71	27.24	27.16	28.03
		9000	30	7.54	7.64	7.38	7.52	7.54	8.18	8.37	7.75
			40	19.39	19.67	19.73	19.30	18.14	19.88	21.83	19.70
			50	34.15	30.31	30.05	27.94	25.17	26.23	27.53	28.77
			60	28.31	30.36	29.06	30.56	31.08	31.63	32.44	30.48
		6000	30	14.53	14.47	14.72	15.88	14.66	17.23	15.82	15.33
			40	26.37	24.68	21.22	24.68	24.68	26.68	26.25	24.92
			50	31.44	33.44	30.66	35.80	28.52	30.96	37.19	32.57
			60	30.28	27.31	28.63	35.74	36.94	37.51	31.91	32.58

表 5.3(b) 伝達率の経時的変化 R_t (%)

コンクリート種類	スラブ (cm)	振動数 (vpm)	筒径 ϕ (mm)	伝達率の経時的変化 R_t (%)							
				振動時間 (秒)							平均値
				5	10	15	20	25	30	60	
non-AEコンクリート	12.0	18000	30	14.03	15.12	14.61	14.16	14.47	14.44	15.32	14.59
			40	25.83	26.04	25.12	23.17	21.49	23.96	23.99	24.22
			50	14.26	14.75	14.74	16.48	16.32	16.12	15.19	15.41
			60	13.27	13.80	14.18	12.83	13.63	13.44	13.32	13.50
		15000	30	15.57	15.65	15.64	14.99	19.79	15.65	15.18	15.59
			40	17.08	15.11	15.39	15.42	15.67	15.50	14.19	15.49
			50	21.02	18.52	18.86	19.42	19.78	20.23	21.46	19.90
			60	16.02	18.35	19.68	17.88	18.33	18.46	18.30	18.15
		12000	30	11.50	11.48	11.87	9.69	12.00	12.11	11.94	11.51
			40	21.84	20.90	23.01	23.35	23.81	23.12	23.01	22.72
			50	21.84	20.90	23.01	23.35	23.81	23.12	23.01	17.49
			60	25.93	24.21	26.33	26.66	26.39	25.73	25.73	25.85
		9000	30	10.28	10.28	10.28	10.28	10.28	10.28	11.38	10.84
			40	8.95	8.95	8.95	8.95	8.95	8.95	8.95	8.95
			50	10.99	10.73	10.90	11.14	11.72	12.24	12.26	12.43
			60	13.37	12.99	12.32	12.17	12.17	12.17	11.85	12.43
		6000	30	6.00	7.47	6.29	7.88	8.58	8.23	8.70	7.58
			40	7.68	8.10	8.17	8.37	9.07	7.89	7.61	8.10
			50	11.80	12.23	11.75	11.61	11.51	12.47	11.89	11.89
			60	13.77	13.77	14.15	14.87	13.22	14.04	14.82	14.10
	18.0	18000	30	11.65	10.12	10.22	9.76	9.60	8.68	8.98	9.86
			40	6.62	7.06	6.33	5.32	5.84	6.74	5.30	6.17
			50	10.74	10.28	10.46	11.96	11.21	11.66	13.36	11.37
			60	15.83	13.20	13.33	12.48	13.43	13.69	13.03	13.13
		15000	30	4.96	4.83	4.65	4.46	4.14	4.40	5.16	4.65
			40	22.58	19.62	22.20	24.39	20.59	20.22	20.82	21.49
			50	21.59	22.37	24.33	18.08	20.96	17.79	16.54	20.24
			60	22.25	26.50	26.43	27.04	26.33	26.66	27.04	26.04
		12000	30	4.60	4.60	4.91	4.58	4.34	4.42	4.42	4.55
			40	13.68	10.52	10.38	10.10	9.58	9.64	10.25	10.60
			50	14.59	13.49	13.22	12.95	12.97	12.77	12.87	13.27
			60	10.74	13.25	12.97	13.63	13.43	13.57	13.87	13.06
		9000	30	5.80	5.72	5.33	4.99	4.99	5.46	5.51	5.41
			40	6.44	6.00	5.52	5.47	5.52	5.52	6.38	5.83
			50	5.75	5.44	4.66	4.17	5.42	4.96	4.09	4.98
			60	5.84	6.10	6.5	6.03	5.37	5.82	6.22	5.98
		6000	30	—	—	—	—	—	—	—	—
			40	—	—	—	—	—	—	—	—
			50	—	—	—	—	—	—	—	—
			60	10.47	11.29	10.53	10.91	11.88	11.78	13.40	11.45

表 5.3(c) 伝達率の経時的変化 R_t (%)

コンクリート 種類	スラブ (cm)	振動数 (vpm)	筒径 ϕ (mm)	伝達率の経時的変化 R_t (%)							
				振動時間 (秒)							
				5	10	15	20	25	30	60	平均値
A Eコンクリート	8.0	12000	30	41.01	40.85	39.63	44.07	33.64	35.18	35.12	38.49
			40	55.88	49.17	40.01	41.58	48.25	43.70	41.15	45.60
			50	44.47	47.85	48.25	46.92	48.09	52.14	47.32	47.86
			60	83.39	75.53	74.47	73.53	71.07	71.57	75.90	75.06
		9000	30	30.51	32.54	32.63	32.54	32.27	35.42	31.81	32.54
			40	49.60	50.99	50.96	51.68	53.04	53.24	53.84	51.90
			50	57.02	55.27	56.78	54.72	62.32	59.82	59.58	57.93
			60	64.69	58.94	64.05	63.92	64.23	65.79	64.61	63.74
	12.0	12000	30	27.43	26.33	26.15	27.66	25.94	25.73	20.71	25.71
			40	62.83	60.07	52.38	48.25	44.68	45.30	45.40	51.28
			50	43.10	37.92	37.17	46.28	37.62	36.91	39.67	39.81
			60	71.92	69.37	62.27	59.00	56.40	57.43	56.01	61.77
		9000	30	15.82	15.80	15.19	14.19	14.14	14.62	12.98	14.67
			40	44.20	42.68	41.59	41.54	37.59	36.96	35.05	39.94
			50	30.89	30.47	26.56	30.13	31.75	29.60	28.89	29.76
			60	46.55	43.37	42.46	44.50	45.87	41.12	41.50	43.62

表 5.4(a) 減衰係数の経時的变化 β (cm^{-1})

コンクリート種類	スラブ (cm)	振動数 (vpm)	筒径 ϕ (mm)	減衰係数の経時的变化 β (cm^{-1})							
				振動時間 (秒)							
				5	10	15	20	25	30	60	平均値
non-AEコンクリート	2.5	18000	30	0.0436	0.0565	0.0571	0.0525	0.0654	0.0582	0.0599	0.0562
			40	0.0443	0.0437	0.0403	0.0429	0.0379	0.0382	0.0380	0.0408
			50	0.0262	0.0223	0.0330	0.0300	0.0318	0.0325	0.0318	0.0300
			60	0.0528	0.0511	0.0607	0.0577	0.0529	0.0499	0.0584	0.0548
		15000	30	0.0481	0.0473	0.0506	0.0575	0.0585	0.0595	0.0574	0.0541
			40	0.0469	0.0434	0.0525	0.0553	0.0599	0.0604	0.0576	0.0537
			50	0.0566	0.0566	0.0567	0.0508	0.0564	0.0540	0.0584	0.0556
			60	0.0511	0.0395	0.0405	0.0468	0.0491	0.0439	0.0440	0.0450
		12000	30	0.0482	0.0479	0.0554	0.0597	0.0609	0.0642	0.0609	0.0567
			40	0.0521	0.0256	0.0235	0.0297	0.0284	0.0263	0.0257	0.0302
			50	0.0317	0.0341	0.0311	0.0323	0.0290	0.0292	0.0281	0.0308
			60	0.0348	0.0376	0.0338	0.0359	0.0341	0.0329	0.0337	0.0347
		9000	30	0.0355	0.0345	0.0302	0.0273	0.0271	0.0317	0.0258	0.0303
			40	0.0361	0.0325	0.0326	0.0307	0.0372	0.0366	0.0427	0.0355
			50	0.0201	0.0180	0.0161	0.0163	0.0142	0.0160	0.0151	0.0165
			60	0.0386	0.0398	0.0355	0.0328	0.0334	0.0333	0.0319	0.0350
		6000	30	0.0582	0.0712	0.0712	0.0712	0.0712	0.0712	0.0712	0.0647
			40	0.0580	0.0580	0.0612	0.0612	0.0612	0.0612	0.0634	0.0606
			50	0.0645	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0613	0.0608	0.0582
			60	0.0297	0.0292	0.0281	0.0281	0.0284	0.0265	0.0267	0.0281
	8.0	18000	30	0.0287	0.0336	0.0278	0.0275	0.0285	0.0283	0.0255	0.0286
			40	0.0316	0.0326	0.0252	0.0274	0.0319	0.0319	0.0267	0.0296
			50	0.0334	0.0350	0.0379	0.0356	0.0356	0.0353	0.0372	0.0358
			60	0.0347	0.0337	0.0353	0.0368	0.0377	0.0321	0.0376	0.0354
		15000	30	0.0298	0.0259	0.0221	0.0255	0.0253	0.0247	0.0247	0.0254
			40	0.0208	0.0214	0.0215	0.0257	0.0255	0.0211	0.0214	0.0225
			50	0.0245	0.0219	0.0216	0.0225	0.0214	0.0208	0.0210	0.0220
			60	0.0295	0.0232	0.0208	0.0210	0.0216	0.0215	0.0222	0.0223
		12000	30	0.0366	0.0258	0.0257	0.0267	0.0278	0.0287	0.0281	0.0285
			40	0.0350	0.0331	0.0339	0.0336	0.0331	0.0338	0.0331	0.0337
			50	0.0283	0.0268	0.0266	0.0292	0.0270	0.0274	0.0267	0.0274
			60	0.0217	0.0227	0.0233	0.0242	0.0267	0.0249	0.0254	0.0241
		9000	30	0.0272	0.0283	0.0218	0.0238	0.0163	0.0187	0.0182	0.0220
			40	0.0221	0.0229	0.0228	0.0242	0.0222	0.0242	0.0277	0.0237
			50	0.0477	0.0400	0.0345	0.0321	0.0272	0.0294	0.0329	0.0348
			60	0.0216	0.0235	0.0237	0.0267	0.0277	0.0290	0.0311	0.0262
		6000	30	0.0326	0.0322	0.0323	0.0333	0.0340	0.0330	0.0284	0.0323
			40	0.0406	0.0403	0.0287	0.0378	0.0378	0.0396	0.0433	0.0383
			50	0.0579	0.0606	0.0573	0.0611	0.0479	0.0537	0.0583	0.0567
			60	0.0567	0.0462	0.0549	0.0619	0.0527	0.0539	0.0419	0.0526

表 5.4(b) 減衰係数の経時的变化 β (cm^{-1})

コンクリート 種類	スラブ (cm)	振動数 (vpm)	筒径 ϕ (mm)	減衰係数の経時的变化 β (cm^{-1})							
				振動時間 (秒)							
				5	10	15	20	25	30	60	平均値
non-AEコンクリート	12.0	18000	30	0.0229	0.0233	0.0252	0.0253	0.0250	0.0243	0.0259	0.0246
			40	0.0252	0.0266	0.0270	0.0247	0.0245	0.0253	0.0251	0.0255
			50	0.0060	0.0067	0.0070	0.0085	0.0083	0.0080	0.0073	0.0074
			60	0.0192	0.0196	0.0201	0.0185	0.0139	0.0195	0.0193	0.0186
		15000	30	0.0278	0.0276	0.0284	0.0299	0.0287	0.0288	0.0288	0.0286
			40	0.0131	0.0126	0.0158	0.0162	0.0149	0.0141	0.0164	0.0147
			50	0.0306	0.0310	0.0300	0.0292	0.0293	0.0287	0.0283	0.0296
			60	0.0130	0.0136	0.0137	0.0125	0.0130	0.0128	0.0129	0.0131
		12000	30	0.0173	0.0131	0.0136	0.0154	0.0119	0.0143	0.0143	0.0143
			40	0.0233	0.0197	0.0202	0.0203	0.0209	0.0212	0.0196	0.0207
			50	0.0144	0.0147	0.0130	0.0102	0.0117	0.0151	0.0148	0.0134
			60	0.0175	0.0157	0.0157	0.0175	0.0180	0.0180	0.0168	0.0167
		9000	30	0.0469	0.0469	0.0469	0.0469	0.0469	0.0469	0.0523	0.0496
			40	0.0448	0.0448	0.0448	0.0448	0.0448	0.0448	0.0448	0.0448
			50	0.0089	0.0081	0.0087	0.0092	0.0114	0.0119	0.0119	0.0100
			60	0.0144	0.0141	0.0136	0.0134	0.0134	0.0134	0.0130	0.0136
		6000	30	0.0166	0.0192	0.0182	0.0190	0.0231	0.0199	0.0202	0.0195
			40	0.0131	0.0154	0.0166	0.0170	0.0193	0.0151	0.0158	0.0160
			50	0.0156	0.0155	0.0157	0.0158	0.0147	0.0160	0.0143	0.0154
			60	0.0154	0.0152	0.0159	0.0168	0.0124	0.0133	0.0141	0.0147
	18.0	18000	30	0.0161	0.0124	0.0119	0.0105	0.0118	0.0097	0.0080	0.0115
			40	0.0091	0.0132	0.0142	0.0097	0.0106	0.0097	0.0095	0.0109
			50	0.0111	0.0112	0.0121	0.0140	0.0131	0.0127	0.0180	0.0132
			60	0.0083	0.0072	0.0038	0.0058	0.0075	0.0102	0.0073	0.0072
		15000	30	0.0280	0.0261	0.0242	0.0241	0.0241	0.0295	0.0332	0.0270
			40	0.0342	0.0305	0.0319	0.0339	0.0319	0.0323	0.0393	0.0334
			50	0.0243	0.0220	0.0243	0.0231	0.0246	0.0249	0.0230	0.0237
			60	0.0116	0.0145	0.0145	0.0154	0.0144	0.0171	0.0162	0.0148
		12000	30	0.0038	0.0029	0.0036	0.0026	0.0019	0.0025	0.0031	0.0029
			40	0.0230	0.0210	0.0212	0.0214	0.0203	0.0191	0.0211	0.0210
			50	0.0122	0.0106	0.0105	0.0112	0.0113	0.0120	0.0120	0.0114
			60	0.0113	0.0109	0.0098	0.0104	0.0104	0.0107	0.0108	0.0106
		9000	30	0.0139	0.0145	0.0121	0.0142	0.0142	0.0131	0.0118	0.0138
			40	0.0147	0.0144	0.0107	0.0103	0.0124	0.0124	0.0144	0.0128
			50	0.0233	0.0235	0.0130	0.0198	0.0186	0.0111	0.0172	0.0181
			60	0.0137	0.0145	0.0186	0.0173	0.0159	0.0167	0.0177	0.0163
		6000	30	—	—	—	—	—	—	—	—
			40	—	—	—	—	—	—	—	—
			50	—	—	—	—	—	—	—	—
			60	0.0334	0.0342	0.0335	0.0341	0.0352	0.0350	0.0369	0.0346

表 5.4(c) 減衰係数の経時的变化 β (cm^{-1})

コンクリート 種類	スラブ (cm)	振動数 (vpm)	筒径 ϕ (mm)	減衰係数の経時的变化 β (cm^{-1})							
				振動時間 (秒)							
				5	10	15	20	25	30	60	平均値
A Eコンクリート	8.0	12000	30	0.0343	0.0362	0.0345	0.0361	0.0318	0.0332	0.0320	0.0340
			40	0.0272	0.0290	0.0266	0.0272	0.0265	0.0271	0.0297	0.0276
			50	0.0445	0.0462	0.0452	0.0453	0.0453	0.0468	0.0464	0.0457
			60	0.0345	0.0326	0.0329	0.0329	0.0325	0.0330	0.0361	0.0335
		9000	30	0.0190	0.0189	0.0188	0.0185	0.0180	0.0213	0.0158	0.0186
			40	0.0217	0.0206	0.0197	0.0196	0.0203	0.0210	0.0209	0.0205
			50	0.0283	0.0257	0.0268	0.0256	0.0270	0.0254	0.0250	0.0263
			60	0.0200	0.0183	0.0196	0.0194	0.0198	0.0212	0.0194	0.0197
	12.0	12000	30	0.0209	0.0209	0.0214	0.0216	0.0204	0.0216	0.0190	0.0208
			40	0.0273	0.0276	0.0253	0.0246	0.0245	0.0256	0.0262	0.0259
			50	0.0321	0.0319	0.0331	0.0376	0.0349	0.0322	0.0361	0.0340
			60	0.0304	0.0329	0.0300	0.0268	0.0267	0.0269	0.0265	0.0286
		9000	30	0.0224	0.0201	0.0197	0.0191	0.0202	0.0226	0.0224	0.0209
			40	0.0278	0.0266	0.0266	0.0270	0.0252	0.0254	0.0256	0.0263
			50	0.0272	0.0266	0.0256	0.0276	0.0278	0.0278	0.0286	0.0273
			60	0.0311	0.0292	0.0301	0.0319	0.0318	0.0304	0.0305	0.0307

5.2 の「伝達率と減衰係数を求める方法」に従って、実験結果から a_0 (振動機表面位置におけるコンクリートの加速度振幅)、伝達率 R_t (振動機の振動部自体の加速度振幅 a_v に対する a_0 の比)、および減衰係数(β)を求めた結果を示したのが表 5.2 (a, b, c) ~ 5.4 (a, b, c) である。

a_0 、 β を求めるために用いた $(r - d/2) \sim \ln(a_m / \sqrt{d/2r})$ の関係を示す図と回帰式は、表 5、6 に一括して掲げてあるが、これらの相関係数は平均 0.920 以上あって高い直線関係を示した。

5.3.2 著者の実験結果と J C I 実験資料の解析

締固め中における波動の伝達率の変化傾向をスランプ 2.5cm と 12.0 cm の non-A E コンクリートについて示したものが図-5.4 である。

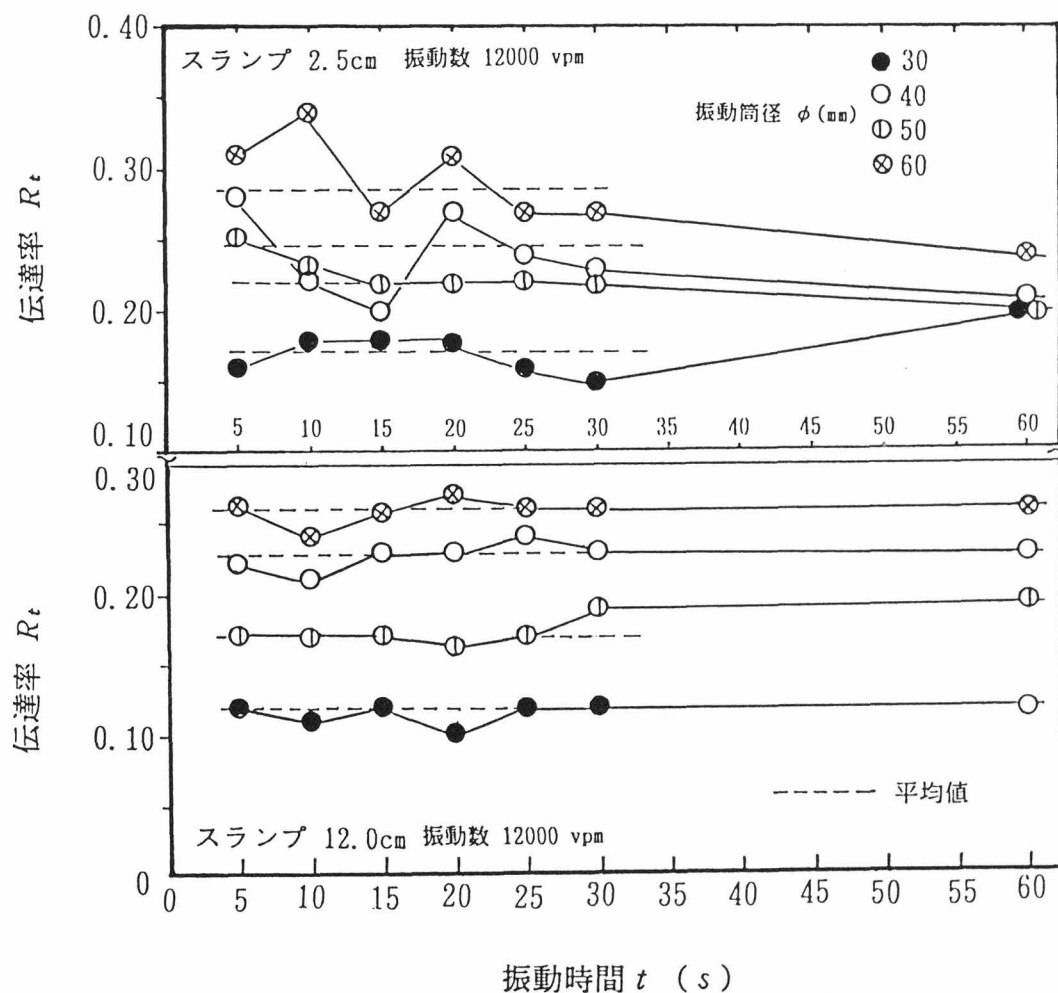


図-5.4 締固め時間による伝達率の変化(non-A E コンクリート)

これをみると、振動締固めの初期段階で、振動筒径の太さの違いによって伝達率の変化がみられるがほとんどの場合に振動時間 5秒から60秒の範囲で伝達率はほぼ一定しているのがわかる。

また、著者がそのメンバーの一員として実験に参画した(社)日本コンクリート工学協会(以後 J C I と略記)フレッシュコンクリートの挙動研究委員会によるコンクリートの振動締固めに関する実験資料を 5.2に述べた方法で解析して示したのが表 5.5, 5.6, 5.7 および表 5.8 であり図-5.6は、表 5.5 の結果を用いて a_0 を算出する過程である。($r - d/2$) と $\ln(a_m / \sqrt{d/2r})$ の直線関係を例示したもので、表 5.5 の相関係数はこれら 2 量間のものである。表 5.6 はこの直線の縦軸切片から得られた a_0 と振動機の振動加速度 a_v との関係を示し、表 5.7 はこれらの比 a_0/a_v として定義した伝達率 R_t を示している。

さらに表 5.8 は図-5.5 の直線の勾配として得られた減衰係数 β であり、これについては後の項で検討する。

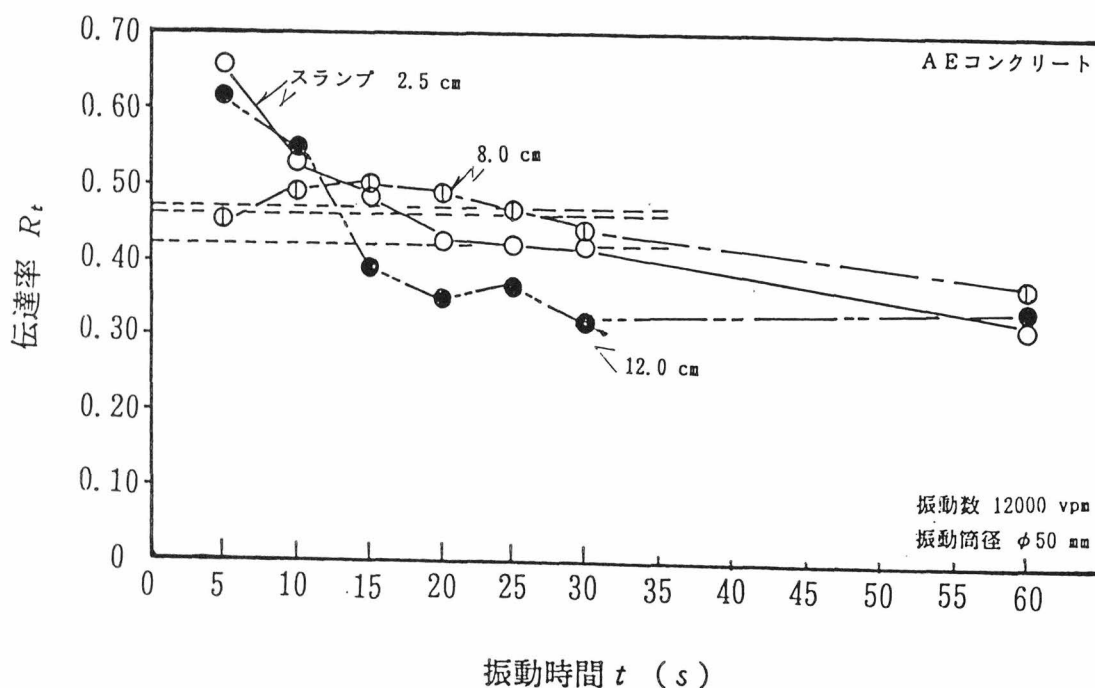


図-5.5 締固め時間による伝達率の変化 (A Eコンクリート : J C I 実験資料からの解析結果で、解析過程は本文中に述べてある)

実験は、空気量 5.0%の A E コンクリートでスランプ 2.5cm, 8.0cm と 12.0cm について行われたものであるが、図-5.4 に示した著者の実験結果(non-A E)と比較すると全体として伝達率が高いこと、振動時間 15 秒程度までの間で伝達率は減少し、それ以後はほぼ一定していることがわかる。

実験に用いた振動機の加速度振幅は、前述のように直径が相違した場合でもそれほど大きく変化していないことから、振動機からコンクリート中への波動の伝達率は、振動機の振動筒の直径とコンクリートの性質によって影響を受けることが明らかであり、振動筒径が $\phi 30\text{mm} \sim \phi 60\text{mm}$ の範囲では、振動部の筒径が太いほど、また、コンクリートの性質としては、A E コンクリートの場合に non-A E コンクリートよりも伝達率が大きく、non-A E コンクリートでは Stiff Consistency の場合に伝達率が大きい傾向が示された。コンクリートの性質に関しては、後の項でさらに詳細に検討する。

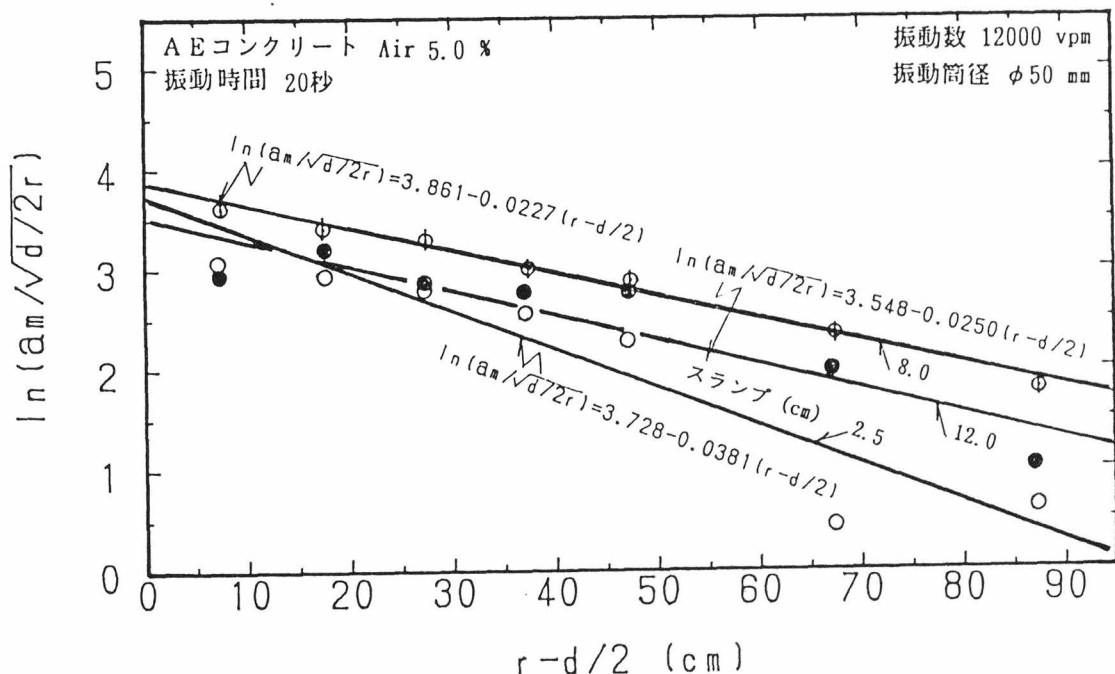


図-5.6 伝播距離と加速度振幅との関係 (JC I 実験資料の解析結果)

表 5.5 振動機からの距離と加速度振幅との関係

(J C I 実験資料の解析結果)

コンクリート	スランブ (cm)	時間 (秒)		$r - d/2$ (cm)							相関係数
				7.50 (10)	17.50 (20)	27.50 (30)	37.50 (40)	47.50 (50)	67.50 (70)	87.50 (90)	
A Eコンクリート Air (5%)	2.5	10	a_m	14.90	8.12	5.51	4.17	2.40	0.29	0.30	0.943
			Y	3.39	3.13	2.95	2.82	2.37	0.44	1.59	
		20	a_m	11.62	7.11	5.04	3.43	2.26	1.29	1.30	0.939
			Y	3.15	3.00	2.86	2.62	2.31	0.44	0.59	
		40	a_m	9.63	7.35	4.57	3.49	2.22	1.14	1.59	0.966
			Y	2.96	3.03	2.76	2.64	2.29	0.59	0.30	
		80	a_m	7.93	6.10	4.65	3.51	2.26	0.51	0.20	0.939
			Y	2.76	2.85	2.78	2.64	2.31	1.00	0.18	
	8.0	10	a_m	21.07	9.27	7.86	4.07	2.98	1.61	0.83	0.990
			Y	3.74	3.27	3.30	2.79	2.59	2.14	1.61	
		20	a_m	18.58	10.78	7.84	5.10	4.02	1.99	0.99	0.993
			Y	3.62	3.42	3.30	3.02	2.89	2.35	1.78	
		40	a_m	15.42	9.96	6.91	4.48	3.91	2.02	0.81	0.976
			Y	3.43	3.34	3.18	2.89	2.86	2.37	1.58	
		80	a_m	13.08	9.11	6.48	4.55	3.28	1.50	0.78	0.982
			Y	3.26	3.25	3.11	2.90	2.69	2.07	1.54	
	12.0	10	a_m	14.84	5.24	3.17	1.84	1.06	0.83	0.23	0.974
			Y	3.50	2.81	2.51	2.11	1.67	1.59	0.43	
		20	a_m	12.90	5.74	3.71	1.85	0.92	0.64	0.23	0.986
			Y	3.36	2.90	2.67	2.11	1.53	1.33	0.43	
		40	a_m	11.13	4.86	3.10	2.00	1.03	0.68	0.23	0.990
			Y	3.21	2.73	2.49	2.19	1.64	1.39	0.43	
		80	a_m	11.77	4.88	3.23	2.02	1.01	0.61	0.23	0.993
			Y	3.27	2.74	2.58	2.20	1.62	1.28	0.43	

() の数字は、振動機中心からの距離 (cm) 振動数 12000(vpm)、筒径 $\phi 50$ (mm)表 5.6 振動時間の変化による a_o と a_v の関係

コンクリート	スラング (cm)		振 動 時 間 (秒)											平均値
			5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	
AEコンクリート Air (5%)	2.5	a_o (G)	63.55	51.89	46.51	41.51	40.42	41.55	35.63	31.52	31.59	31.70	34.61	96.20
		$l_n a_o$	4.15	3.95	3.84	3.73	3.70	3.73	3.57	3.45	3.45	3.46	3.54	
		a_v (G)	96.20	96.20	96.20	96.20	96.20	96.20	96.20	96.20	96.20	96.20	96.20	
	8.0	a_o (G)	43.28	47.39	48.78	47.52	46.06	42.80	42.15	40.18	36.14	36.45	38.09	96.20
		$l_n a_o$	3.77	3.86	3.89	3.86	3.83	3.76	3.74	3.69	3.56	3.60	3.64	
		a_v (G)	96.20	96.20	96.20	96.20	96.20	96.20	96.20	96.20	96.20	96.20	96.20	
	12.0	a_o (G)	62.03	53.77	38.09	34.77	36.24	30.98	—	—	32.45	33.08	35.06	97.90
		$l_n a_o$	4.13	3.99	3.64	3.55	3.59	3.43	—	—	3.48	3.50	3.56	
		a_v (G)	97.90	97.90	97.90	97.90	97.90	97.90	—	—	97.90	97.90	97.90	

 a_o : 振動機表面位置でのコンクリートの加速度振幅 (G)振動数 12000 (vpm), 筒径 $\phi 50$ (mm) a_v : 振動機の加速度振幅 (G)

表 5.7 伝達率の経時的変化 (JC I 実験資料の解析結果)

コンクリート	スランブ (cm)	振動数 (vpm)	筒径 (mm)	伝達率の経時的変化 R_t (%)							
				振 動 時 間 (秒)							
				5	10	15	20	25	30	60	平均値
AEコンクリート Air (5%)	2.5	12000	50	66.06	53.94	48.34	43.15	42.01	43.19	32.83	47.07
			60	45.86	48.80	43.46	43.65	42.60	49.68	41.43	45.07
	8.0	12000	50	44.99	49.26	50.71	49.40	47.87	44.49	37.57	46.33
			40	40.37	45.20	46.65	46.22	46.04	46.79	41.50	44.68
	12.0	12000	40	40.37	45.20	46.65	46.22	46.04	46.79	41.50	44.68
			50	63.36	54.92	38.90	35.51	37.02	31.64	33.15	42.07

表 5.8 減衰係数の経時的変化 (JC I 実験資料の解析結果)

コンクリート	スランブ (cm)	振動数 (vpm)	筒径 (mm)	減衰係数の経時的変化 β (cm ⁻¹)							
				振 動 時 間 (秒)							
				5	10	15	20	25	30	60	平均値
AEコンクリート Air (5%)	2.5	12000	50	0.0462	0.0408	0.0396	0.0380	0.0371	0.0372	0.0311	0.0386
			60	0.0370	0.0375	0.0366	0.0349	0.0330	0.0358	0.0319	0.0352
	8.0	12000	50	0.0201	0.0259	0.0230	0.0227	0.0220	0.0211	0.0238	0.0227
			40	0.0317	0.0341	0.0357	0.0356	0.0337	0.0347	0.0341	0.0342
	12.0	12000	40	0.0317	0.0341	0.0357	0.0356	0.0337	0.0347	0.0341	0.0342
			50	0.0319	0.0311	0.0262	0.0250	0.0266	0.0224	0.0208	0.0263

JCIによるコンクリートの振動締固めに関する実験を写真 5.1および写真 5.2 に示した。



写真 5.1 JCI振動締固めによるコンクリートの打設状況



写真 5.2 JCI振動締固めによるコンクリートスラブの実験
(スラブ 12.0cm, 振動数 12000vpm, 筒径φ40mm, 振動時間 30秒)

5.4 伝達率に関する分析と考察

5.4.1 振動機の特徴が伝達率におよぼす影響

(1) 振動数に関する考察

振動機の振動数を 6000rpm~18000rpm に変化させたときの伝達率と振動数との関係を示したのが図-5.7 である。振動数が変化した場合、スランプ 2.5cm の硬練りコンクリートでは低速振動 (100Hz~150Hz) の方が高速振動 (200Hz~300Hz) よりも伝達率が大きいことが特徴的であり、コンクリートのスランプが 12.0~18.0cm の範囲の軟練りコンクリートおよびやや硬練りコンクリートではコンクリートの性質にあっても振動数による影響が少ないことを図-5.7 は示している。

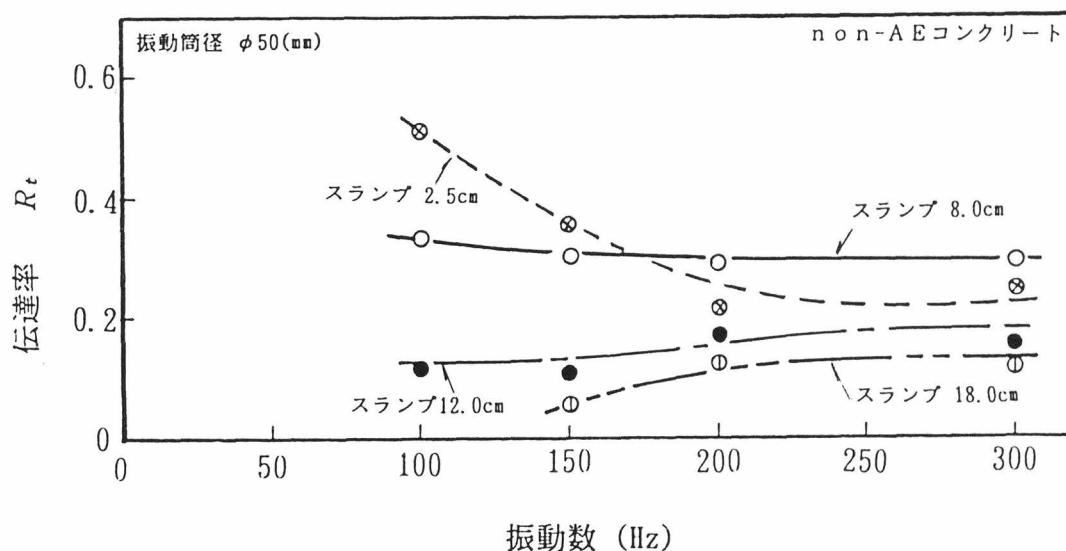


図-5.7 伝達率と振動数との関係

(2) 振動筒についての考察

図-5.8 および図-5.9 は、振動筒径が $\phi 30\text{mm}$ ~ $\phi 60\text{mm}$ に変ったときのコンクリートの伝達率を示したものである。振動数が高速の12000rpmの場合であるが、コンクリートの性質が異なる場合でも、伝達率は振動機の振動筒径による伝達率の影響があって、コンクリートが硬いほど、また、振動筒の直径が大きいほど伝達率の値が増大することを図-5.8 および図 5.9 は示している。このような状況のもとにおいても A E コン

クリートの伝達率は、non-AEコンクリートに比べて約 2.0～2.5倍 の伝達率を示すことが認められる。

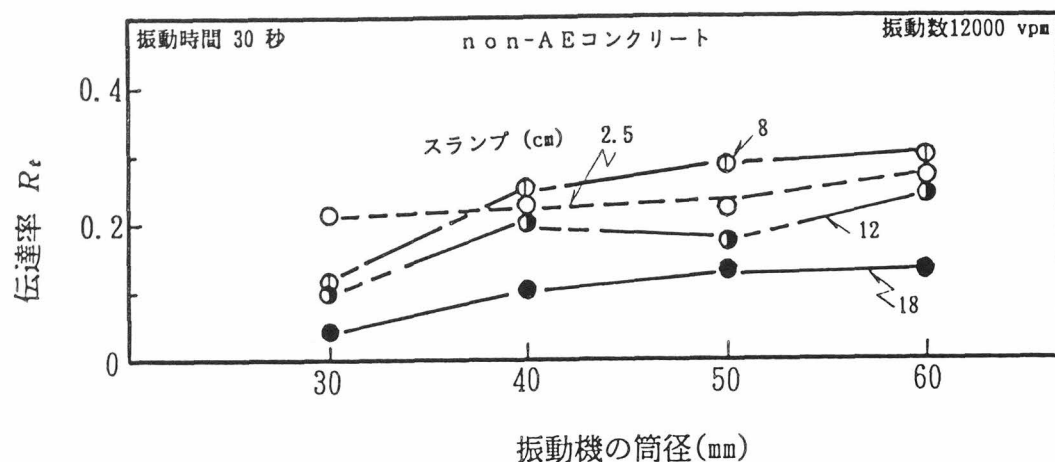


図-5.8 伝達率と振動数との関係

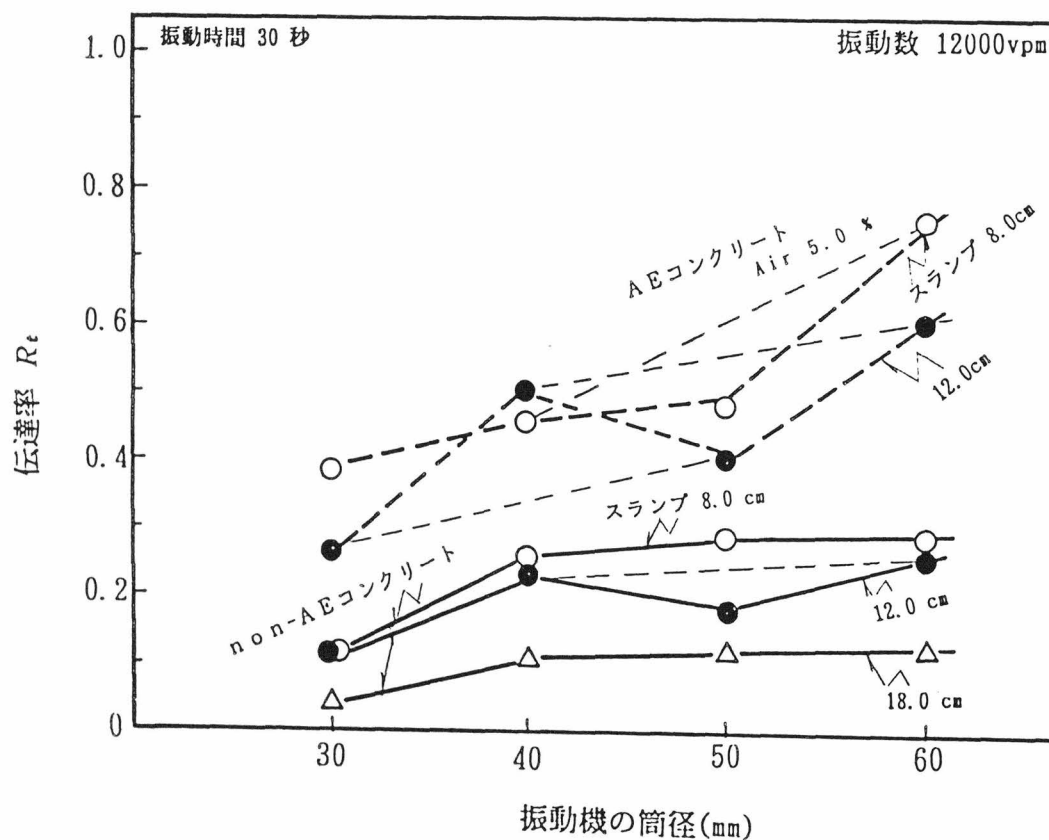


図-5.9 伝達率におよぼす振動機の筒径の影響

5.4.2 コンクリートの性質が伝達率におよぼす影響

(1) スランプと振動機の筒径についての考察

コンクリートの流動についての性質を表すスランプは、コンクリート施工における重要な状況判断の指標として用いられる。スランプの値が変わって、さらに、振動機の振動筒径の太さが様々に変化したときの振動筒径およびスランプ値と伝達率との関係がどうであるかについて示したのが図-5.10 である。

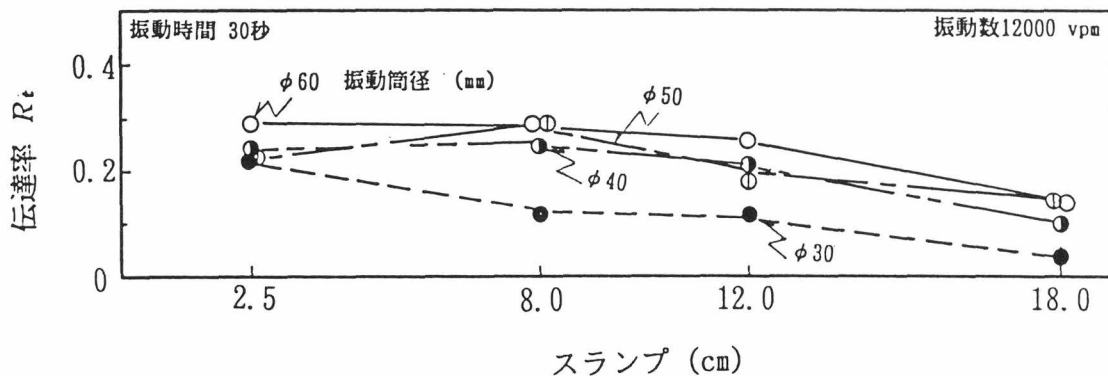


図-5.10 コンクリートの性質が伝達率におよぼす影響

スランプが 2.5cmの硬練りコンクリートの場合に伝達率は大きくなっているが、振動筒径 φ30mm を除いては、スランプ 2.5cm~12.0cm の範囲ではほぼ等しい伝達率を示している。しかし、スランプ 18.0cm の軟練りコンクリートの場合に伝達率が小さくなっていることがわかる。

このように、振動締固めの際の振動の伝達は、コンクリートの性質の影響よりも、振動筒径の太さの差による影響をより大きく受けていることから、振動筒径の太さがコンクリートの振動伝達に重要な役割をするものと結論できる。

(2) A Eコンクリートと non-A Eコンクリートの比較

図-5.11 は、スランプ 8.0cm~12.0cm、空気量が 5.0%の A Eコンクリートとコンクリートの伝達率を比較したものである。これをみると、A Eコンクリートの伝達率は non-A Eコンクリートの約 1.4~1.8倍になっていて、コンクリートに空気を混入することによって、振動機からコンクリート中への振動の伝達は大きくなることを示している。

すでに、図-5.9に示したように、A Eコンクリートの場合には、non-A Eコンクリートよりも振動機の振動筒径を太くすることによる伝達率への影響が大きいから、本研究によりA Eコンクリートの締固めに対する有利性が確認されたものと考える。

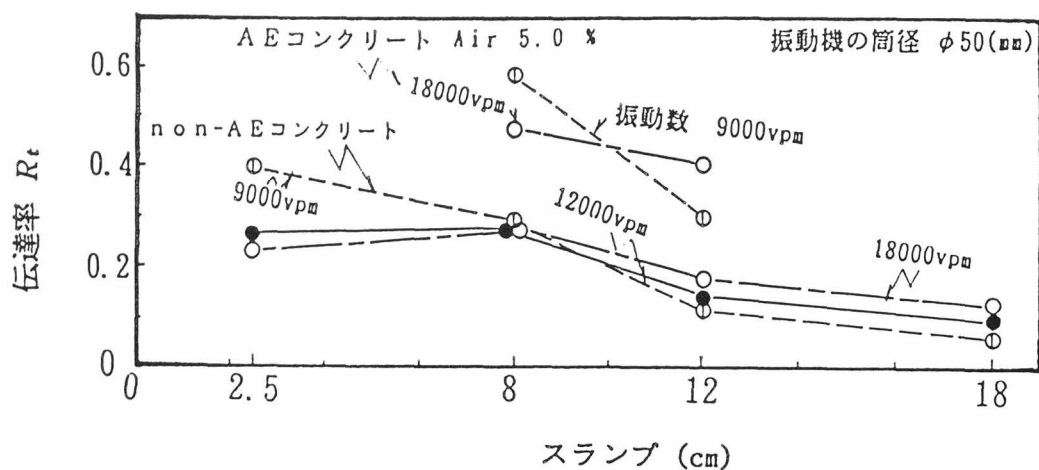


図-5.11 A Eコンクリートと non-A Eコンクリートの伝達率

5.5 減衰係数に関する分析

5.5.1 コンクリートの性質と減衰係数との関係

(1) 振動時間についての考察

コンクリートの性質が Stiff Consistency の場合(スランプ2.5cm)と Plastic Consistency の場合(スランプ12.0cm)について、60秒間締固めたときの減衰係数の経時変化の関係を示したのが図-5.12である。締固め時間が経過しても減衰係数の大きな変化はみられず 30秒から2倍の60秒になっても減衰係数の値が余り変わらない。このように振動時間を長くしても締固めによる振動の減衰が変わらないことは、減衰特性が主として練り上がったコンクリートの性質によって定まり、締固めの進行にはそれほど大きく影響しないことを示している。これは、元来減衰が大きいコンクリートは締固め時間を長くしても減衰が小さくならないことを意味している。

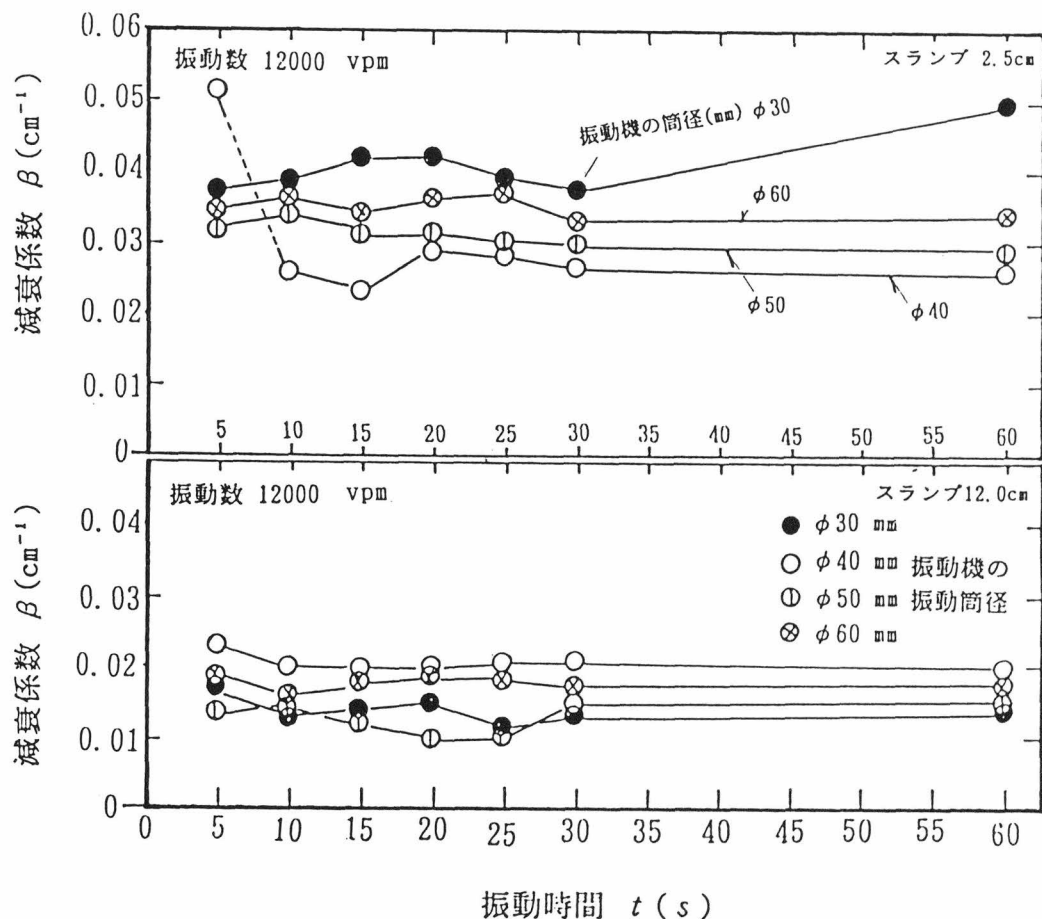


図-5.12 締固め時間による減衰係数の変化

(2) スランプについての考察

減衰係数の場合も振動時間の経過によっての変化が小さいことが認められたが、どのような状態で減衰係数が大きく、あるいは、小さいかが問題となるため、それらを明らかにすることが必要であると考え、コンクリートの性質と減衰係数との関係を示したのが 図-5.13 である。

図-5.13 は、スランプを 2.5cm, 8.0cm, 12.0cm および 18.0cm と変えて、振動数は 12000rpm と一定とし、振動筒径 $\phi 50\text{mm}$ と $\phi 60\text{mm}$ の場合についてのコンクリートの性質と減衰係数との関係を示している。減衰係数の変化は、コンクリートの性質によって変っているが、Stiff なコンクリートほど減衰係数は大きく、Plastic なコンクリートほど小さい値を示している。このことは、コンクリートの流動・変形に関係した性質が相違したことによって、減衰係数が変化することを示している。

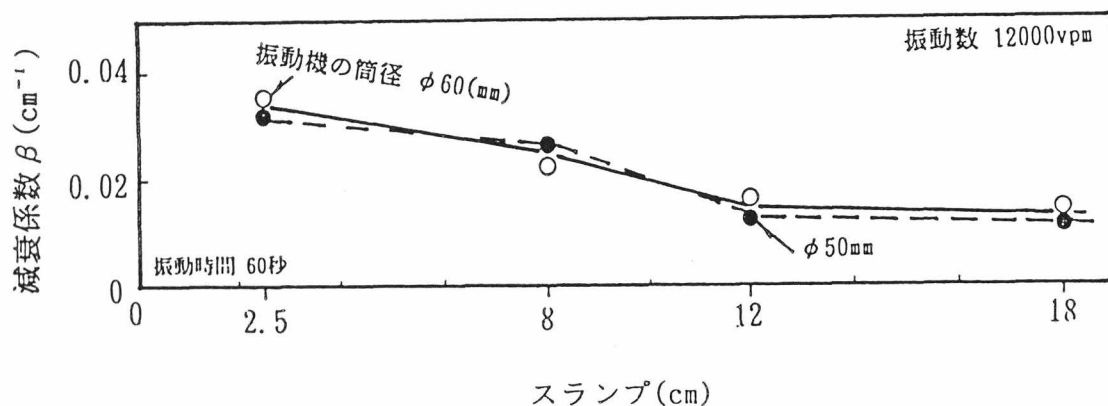


図-5.13 減衰係数におよぼすコンクリートの性質の影響

5.5.2 振動機の特性と減衰係数との関係

(1) 振動数についての考察

図-5.14は、振動筒径を $\phi 50\text{mm}$ と一定とし、振動数を 9000rpm, 12000rpm および 18000rpm におけるコンクリートの性質による減衰係数への影響があって、減衰係数は、硬練りコンクリートで大きく、軟練りのコンクリートほど小さくなる傾向になることを意味している。

また、同一条件では振動数にかかわらず、減衰係数はほぼ一定である。これは、減衰係数が振動伝播の媒体であるコンクリートの性質によって主に支配され、伝播する振動の振動数は 150~300Hz の範囲ではほとんど影響しないことを示している。

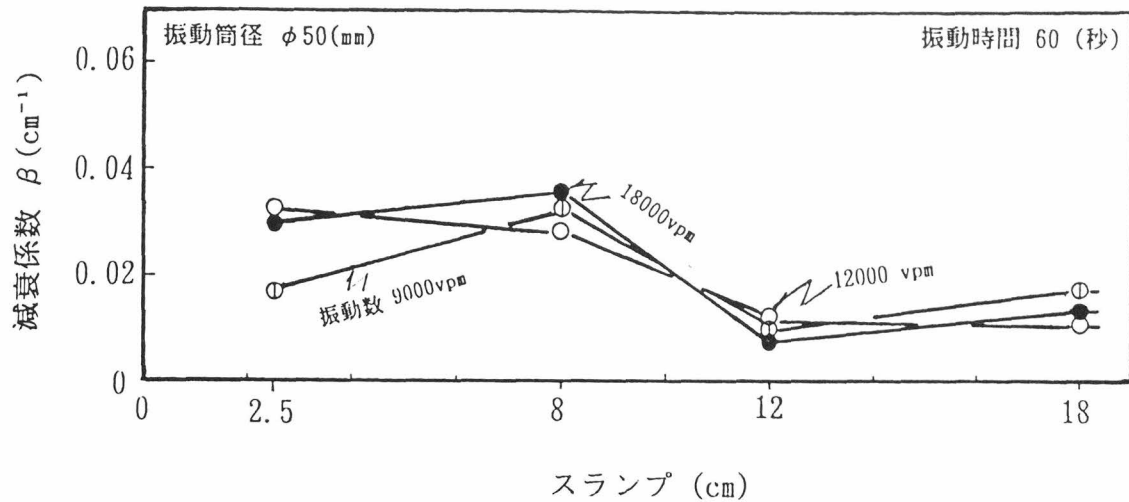


図-5.14 減衰係数におよぼす振動数の影響

さらに、振動機の振動数を 100Hz～300Hz に変化させて、コンクリートの性質を 2 種類に変えたときの減衰係数と振動数との関係について図示したのが図-5.15 である。

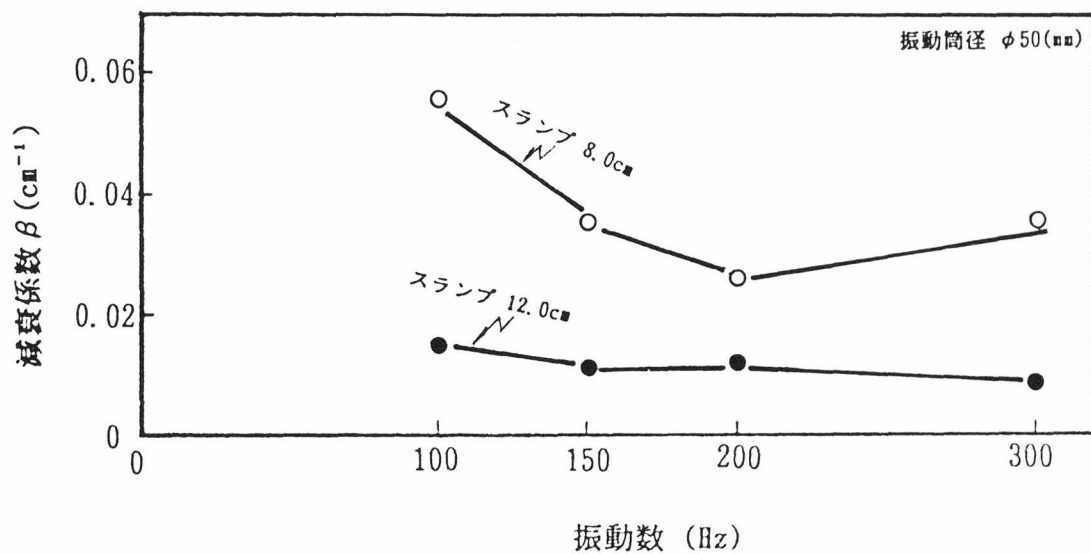


図-5.15 振動機の振動数と減衰係数との関係

スランプ 8.0cmのやや軟練りのコンクリートでは、低速振動（100Hz）と高速振動（300Hz）で減衰係数が大きくなっているが、スランプ12.0cmの軟練りコンクリートは、ほぼ一定の傾向を示していることから、減衰係数は、コンクリートの性質による違いの影響と振動機の実特性による違いとの双方によって、判断することが必要であることを示唆している。しかし、図-5.13 について考察したように、減衰係数は主としてコンクリートの性質によって定まると考えるのが妥当であって、図-5.15の振動数 100Hz の結果は、振動機の加速度自体が小さかったためにやや硬練りのスランプ 8.0cmのコンクリートで減衰係数が大きく求まったものと思われる。

(2) 振動筒径についての考察

図-5.16 は、スランプ 2.5cm の硬練りコンクリートと12.0cm の軟練りコンクリートについて振動時間を 30秒, 振動数を 12000rpm と一定にした条件で、振動筒径を $\phi 30\text{mm}$, $\phi 40\text{mm}$, $\phi 50\text{mm}$ と $\phi 60\text{mm}$ の4種類に変えた場合の結果である。これをみると、振動機の直径にかかわらず、ほとんど一定であることから、減衰係数は振動機の振動特性には影響されないことがわかる。(図-5.17)

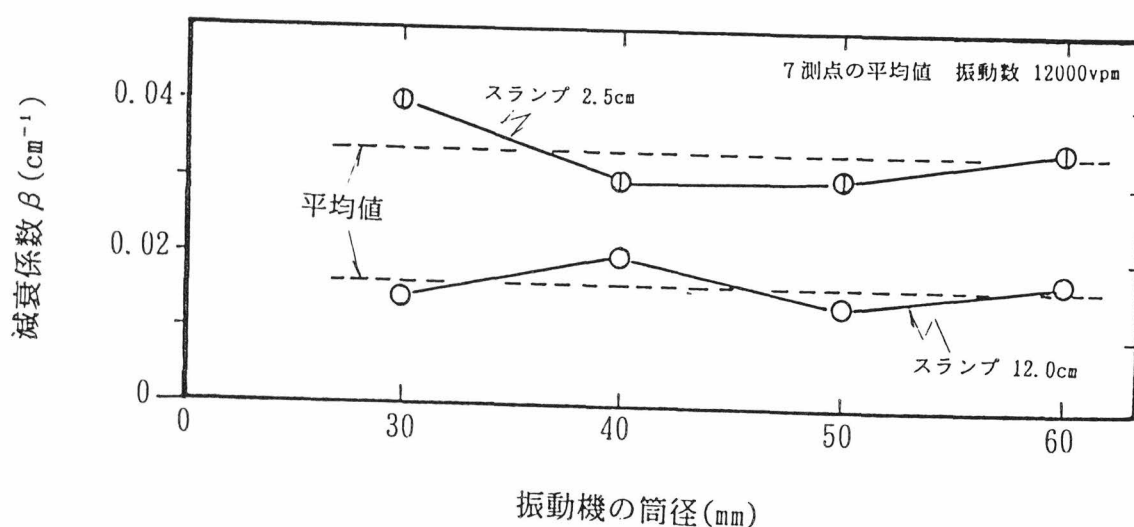


図-5.16 振動機の振動筒径におよぼす減衰係数の影響

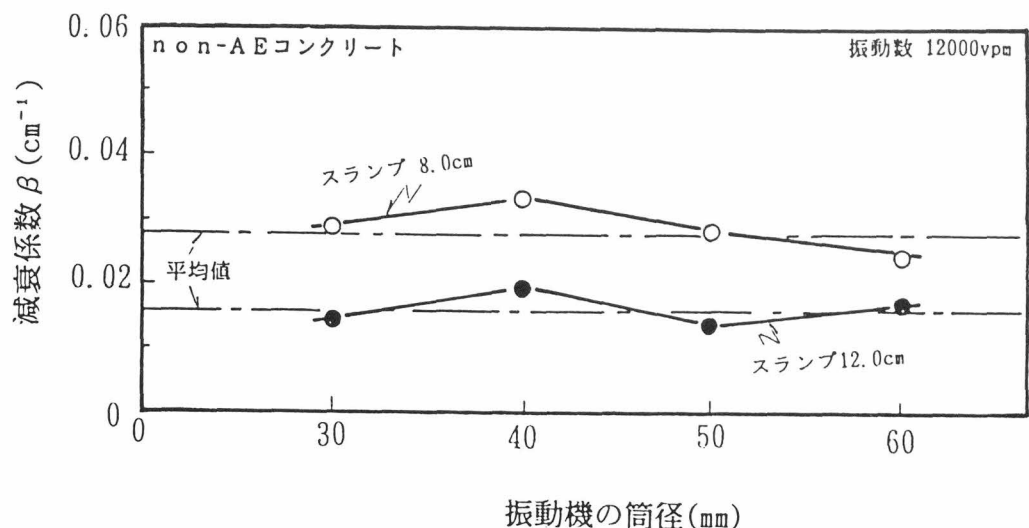


図-5.17 振動機の振動筒径におよぼす減衰係数の影響

5.5.3 伝達率と減衰係数の相関性

スランプ 2.5cm の硬練り non-AE コンクリートについて、振動数と振動筒径の特徴を変えてコンクリートの性質を一定としたときの、伝達率と減衰係数との関係を示したのが図-5.18 である。

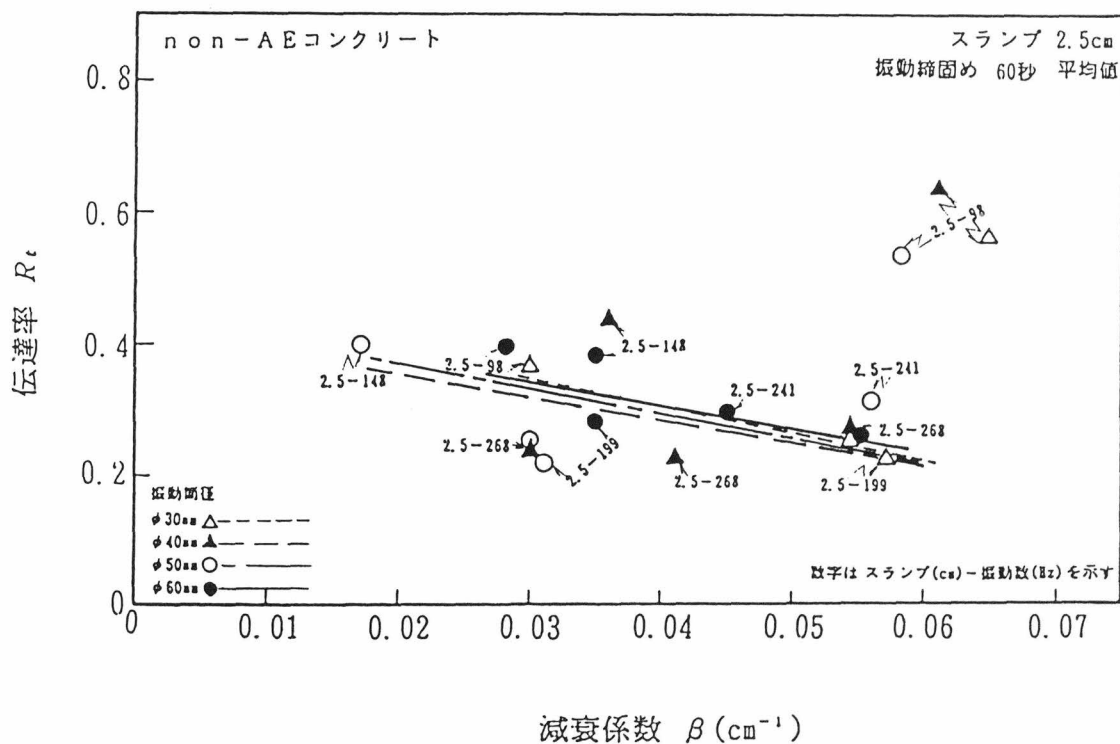


図-5.18 伝達率と減衰係数の関係(non-AEコンクリート, スランプ 2.5cm)

伝達率と減衰係数との関係から伝達率が大きくなるとそれと同時に減衰係数も大きくなっていて、低速振動数にその影響が顕著になっている。スランプ 2.5cm の硬練り non-AE コンクリートの場合は、高速振動数 $f = 268(\text{Hz})$ を使用して締固めたコンクリートの減衰係数は、低速振動数 $f = 98(\text{Hz})$ よりも伝達率が小さい割には減衰係数の値は大きくなっている。

次に、スランプ 8.0cm とコンクリートの性質が変わった結果の伝達率と減衰係数との関係を同じにまとめたのが図-5.19 である。スランプ 8.0cm のコンクリートにおいては伝達率と減衰係数との関係は、伝達率が大きい場合に減衰係数も大きくなっている。しかし、スランプ 2.5cm の硬練りコンクリートで最も大きい値を示した伝達率と減衰係数に対して、スランプ 8.0cm のコンクリートは約70%~80%に減少している。

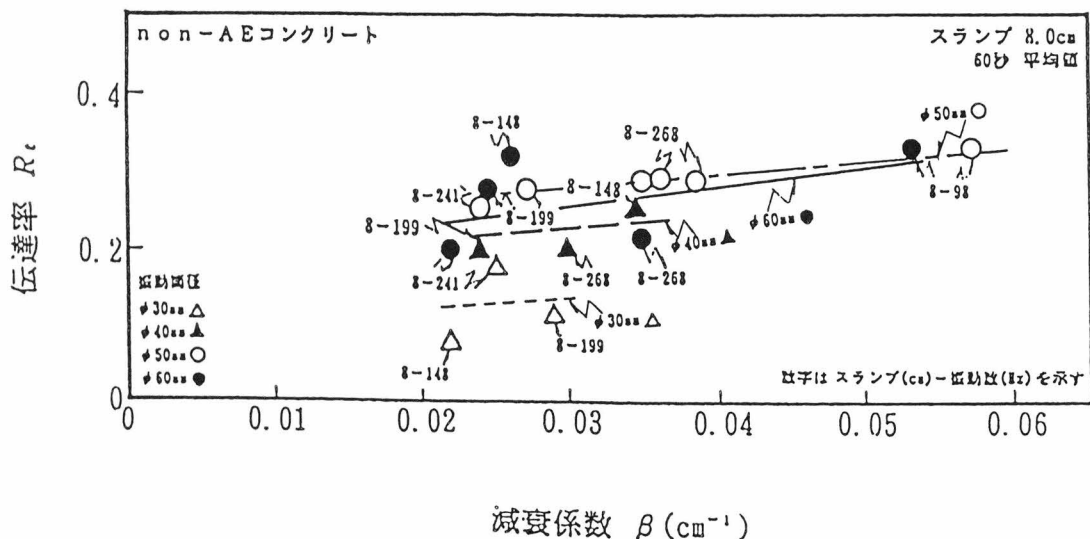


図-5.19 伝達率と減衰係数の関係(non-AEコンクリート, スランプ 8.0cm)

また、コンクリートの性質が変わって軟練りになったスランプ 12.0 cm のコンクリートについて図示したのが図-5.20 である。伝達率と減衰係数の関係は、スランプ 2.5cm およびスランプ 8.0cm のコンクリートに比較してやや鈍化していて、伝達率が小さい場合に減衰係数が大きくなっているが、振動数 148Hz の他の減衰係数の値は $0.01(\text{cm}^{-1})$ の範

囲にあって減衰係数が小さくなる傾向を示している。さらに、軟練りとしたスランブ 18.0cm のコンクリートについて伝達率と減衰係数の関係を図-5.21 に示した。

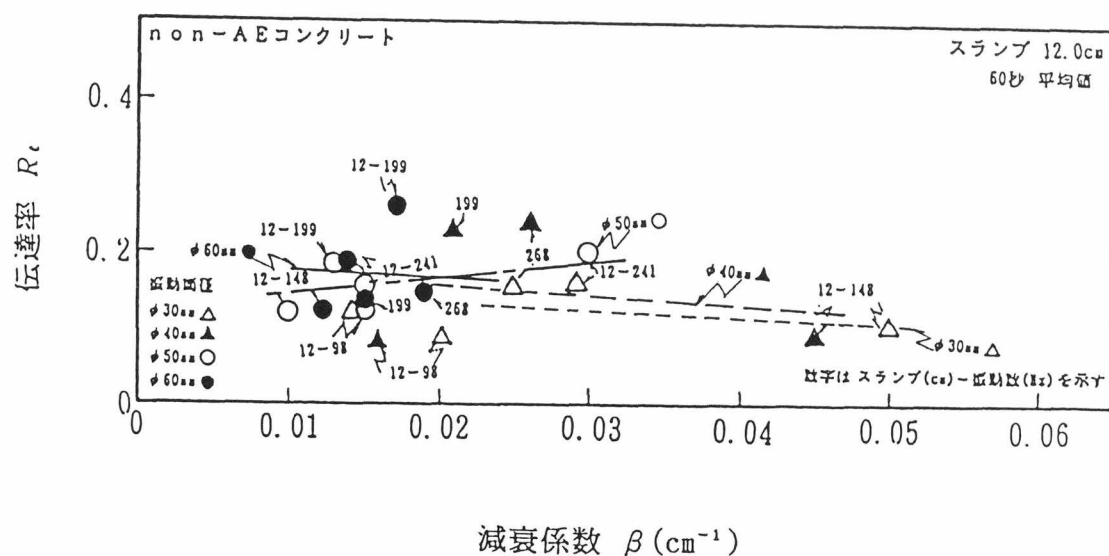


図-5.20 伝達率と減衰係数の関係(non-AEコンクリート, スランブ 12.0cm)

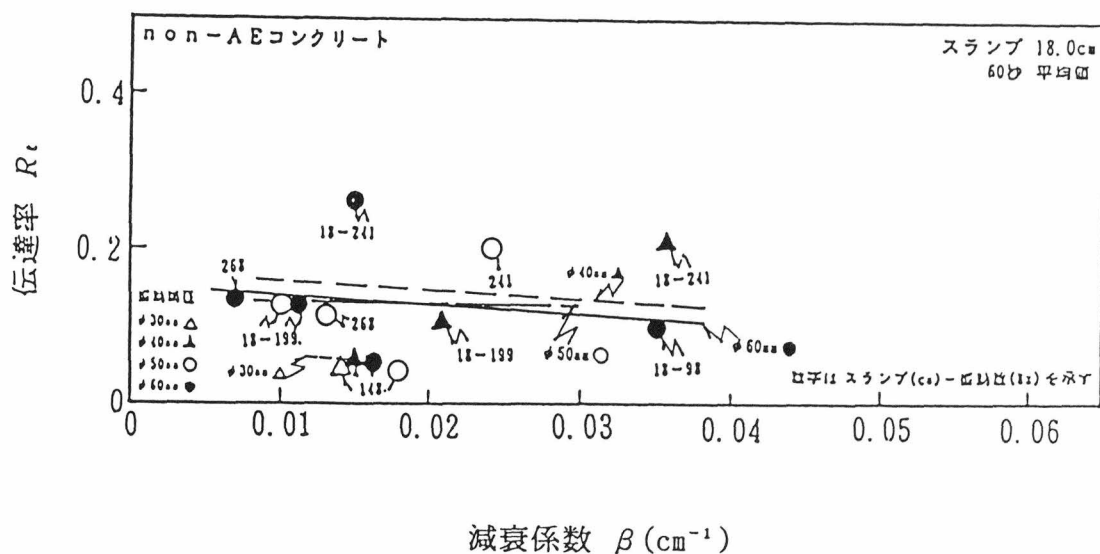


図-5.21 伝達率と減衰係数の関係(non-AEコンクリート, スランブ 18.0cm)

図-5.21 からみられることは、振動特性が変わっても伝達率と減衰係数との関係は小さくなっていて、伝達率が大きくなると減衰係数も大きくなるという相関性から伝達率も大きくならないが減衰係数も大きくなるという関係に変わっている。この関係は、コンクリートの性質が振動機の振動特性に適應しない状態にあって締固めてもコンクリートが締固まらないことを意味しているもので、締固まらない軟練りコンクリートにおいて伝達率も小さいが減衰係数も小さいという現象が生じているものと考える。

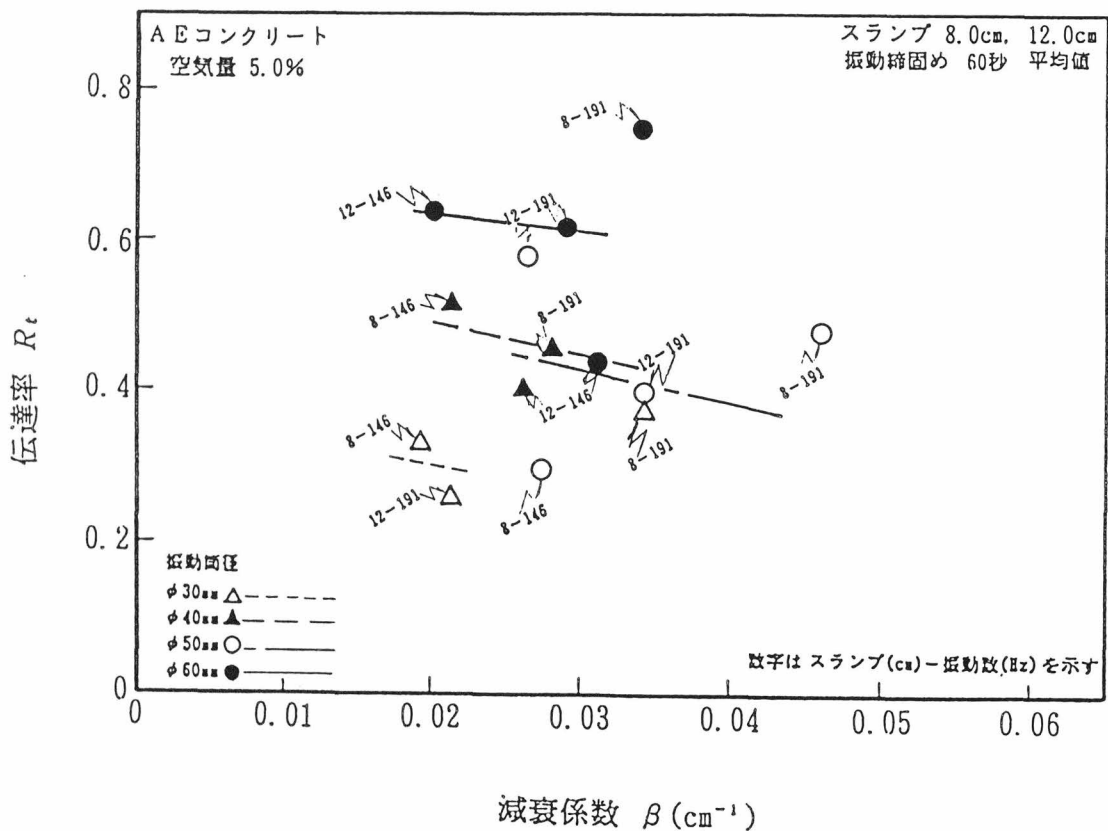
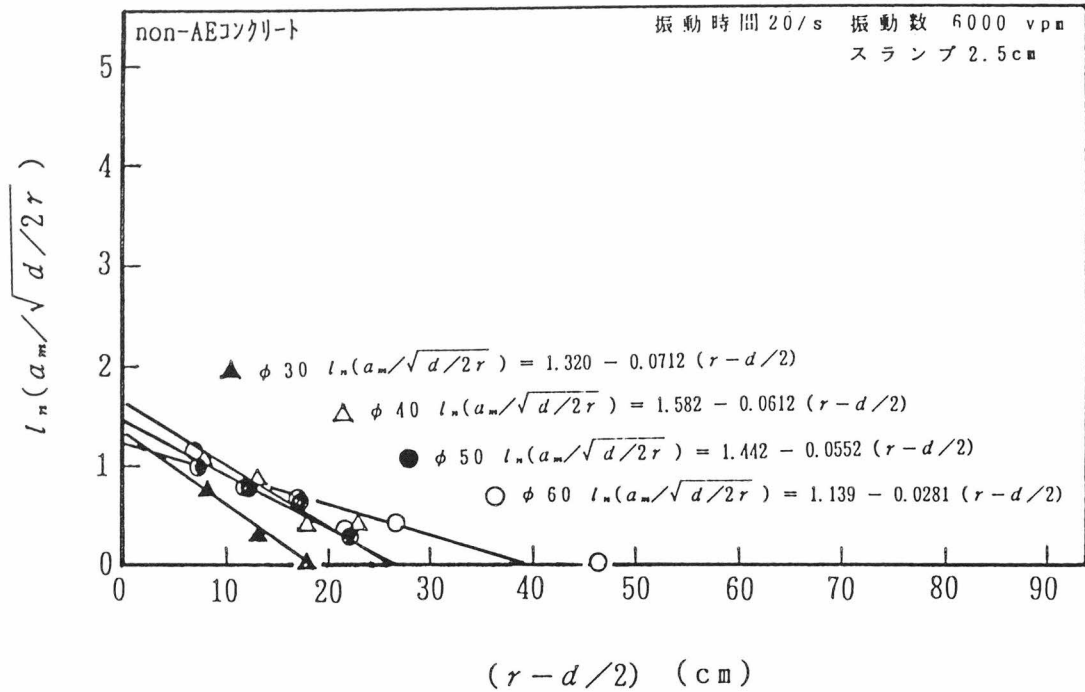


図-5.22 伝達率と減衰係数の関係(AEコンクリート, スラブ 8.0cm, 12.0cm)

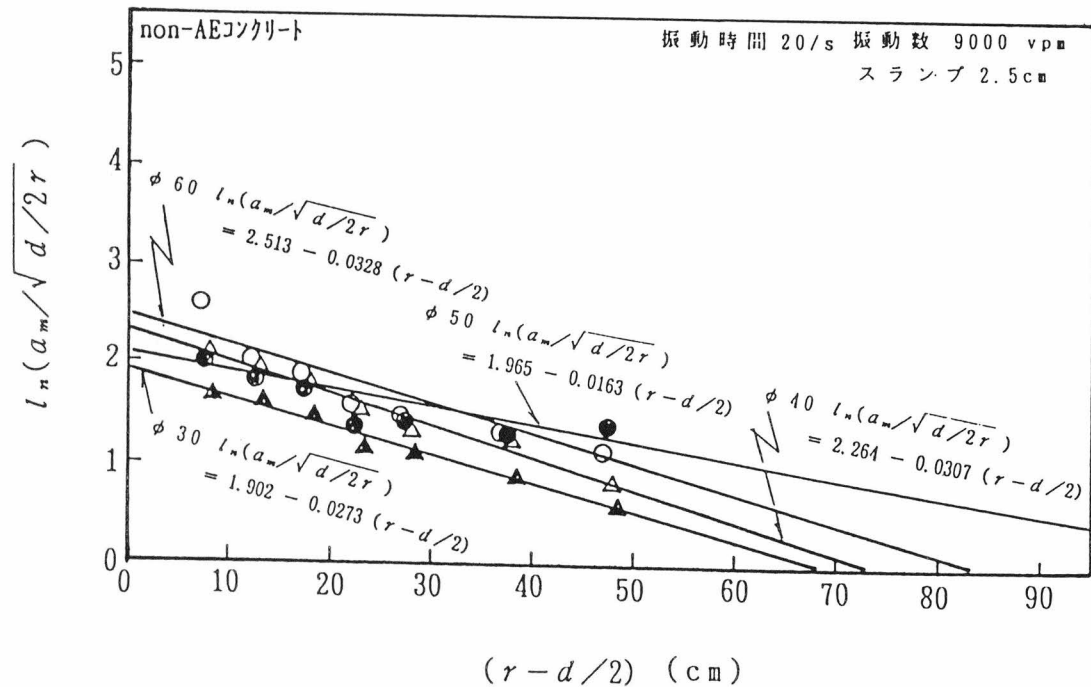
これまで、non-AEコンクリートのスランプ 2.5cm のコンクリートからスランプ 18.0 cmの軟練りコンクリートの伝達率と減衰係数についての相関性について明らかにしてきたが、AEコンクリートの場合には、締固めの進行にともなって、伝達率と減衰係数が変化するとの実験結果¹⁵⁵⁾から、これらの伝達率と減衰係数の数値も non-AEコンクリートとAEコンクリートとは相違すると考えられるのでこれらのコンクリートに関しての相関性について検討したのが図-5.22 である。

図-5.22 は、non-AEコンクリートと同様に振動機の変えて、スランプ 8.0cm とスランプ12.0cm のコンクリートの性質における空気量 5.0%のAEコンクリートの伝達率と減衰係数との関係を示した図である。non-AEコンクリートのスランプ 8.0cm のコンクリートと同じく伝達率と減衰係数に関係があって、伝達率が大きい場合に減衰係数も大きくなる傾向を示しているが、non-AEコンクリートに比較して、伝達率の値が大きくなっているにも拘わらず減衰係数の値は $0.03(\text{cm}^{-1})$ から $0.04(\text{cm}^{-1})$ の範囲にあって小さくなっている。この関係から、振動機からコンクリートへの振動の伝達率が大きくその減衰が小さいことは、締固めによる理想的な合理性と有効性の関係を示しているものと考えられ、AEコンクリートが non-AEコンクリートに比較して、適切な振動特性を有する振動機で締固めればより効果的な振動締固めが可能であることを示唆しているものとする。

5.5.4 伝播距離と加速度振幅の実験結果(non-AEコンクリート)

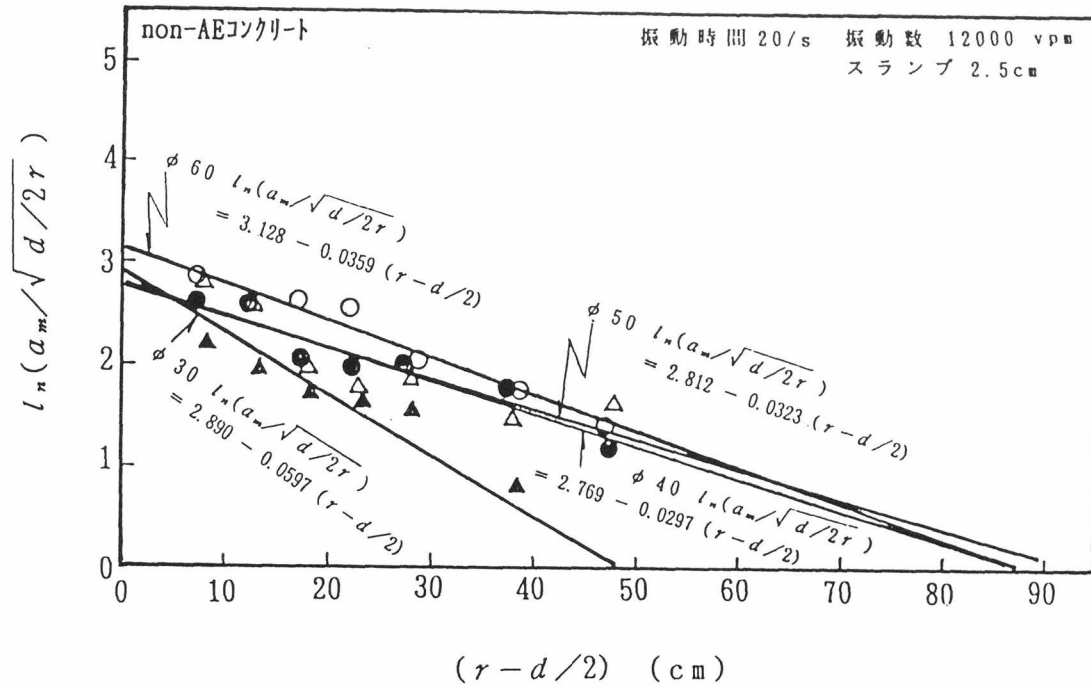


振動数 f : 100 (Hz)

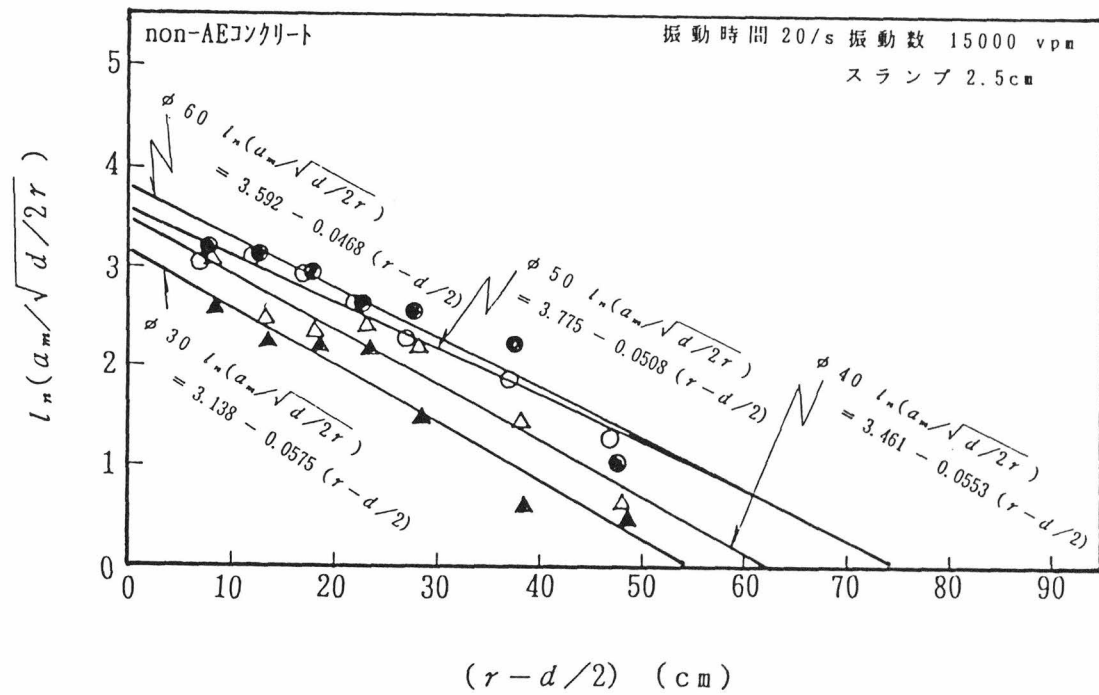


振動数 f : 150 (Hz)

伝播距離と加速度振幅の実験結果(non-AEコンクリート)

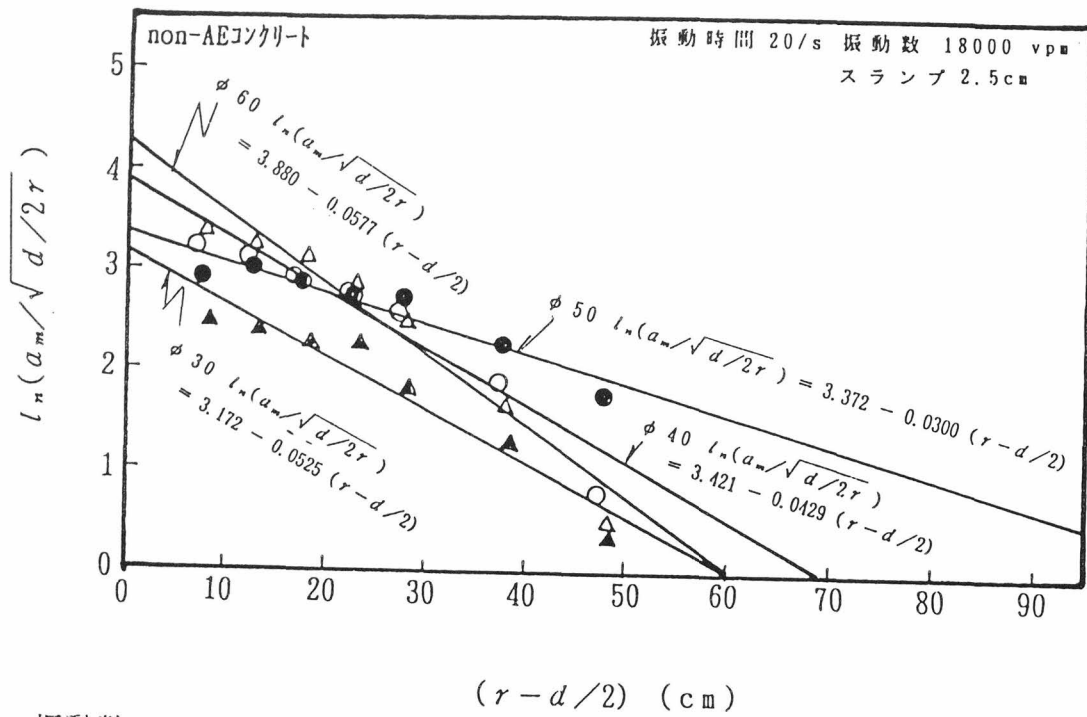


振動数 f : 200 (Hz)



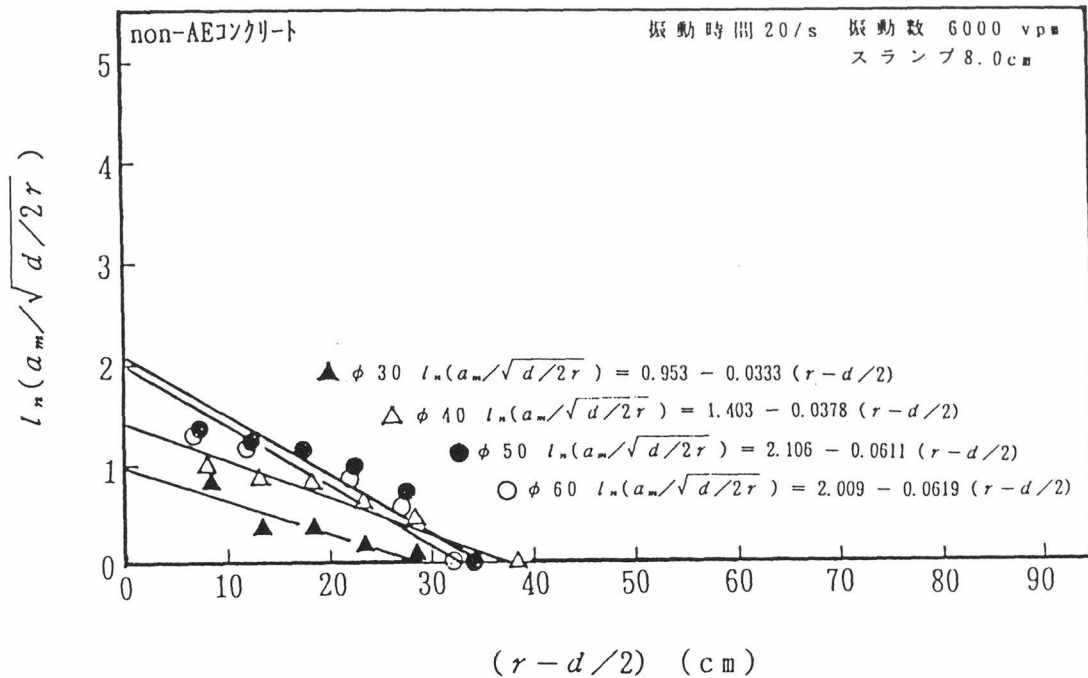
振動数 f : 250 (Hz)

伝播距離と加速度振幅の実験結果(non-AEコンクリート)

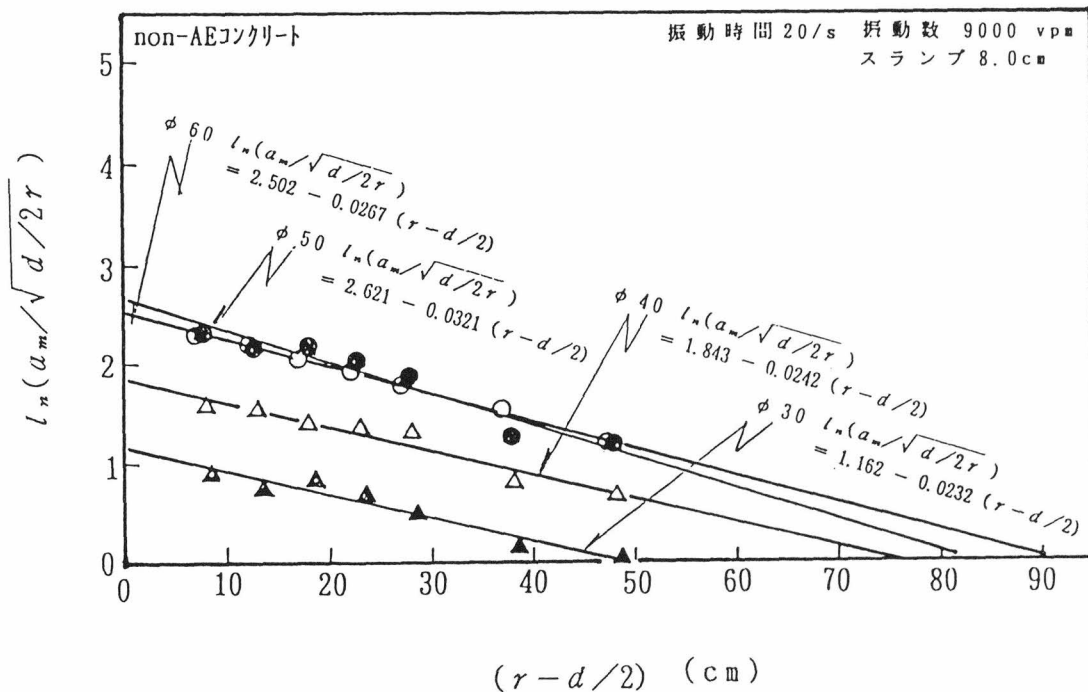


振動数 f : 300 (Hz)

伝播距離と加速度振幅の実験結果 (non-AEコンクリート)

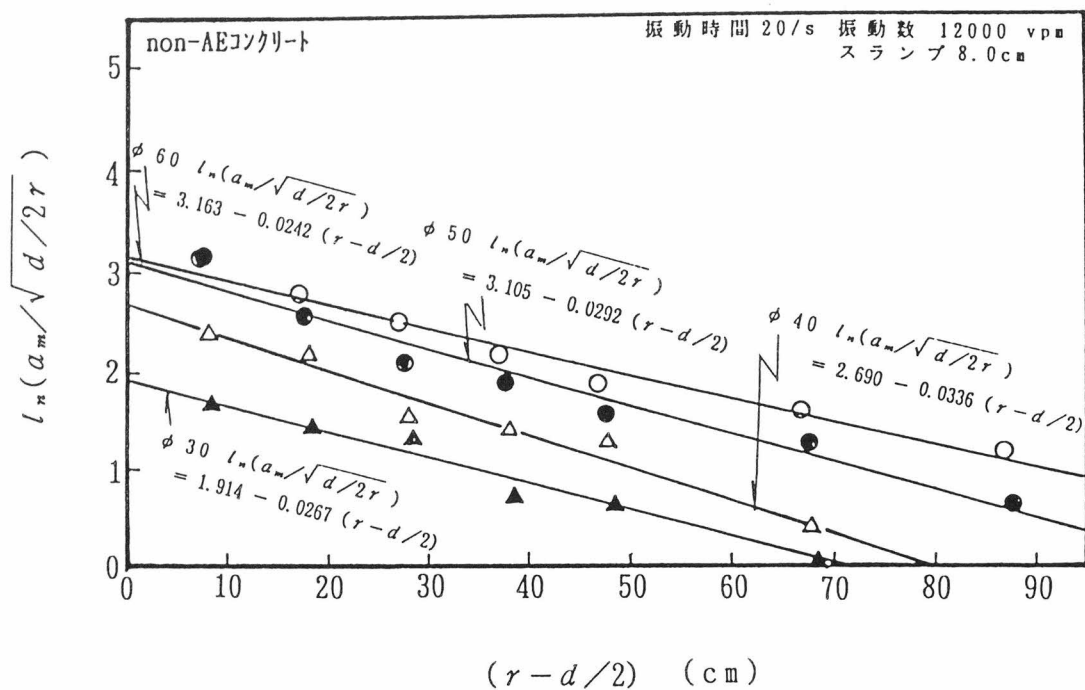


振動数 f : 100 (Hz)

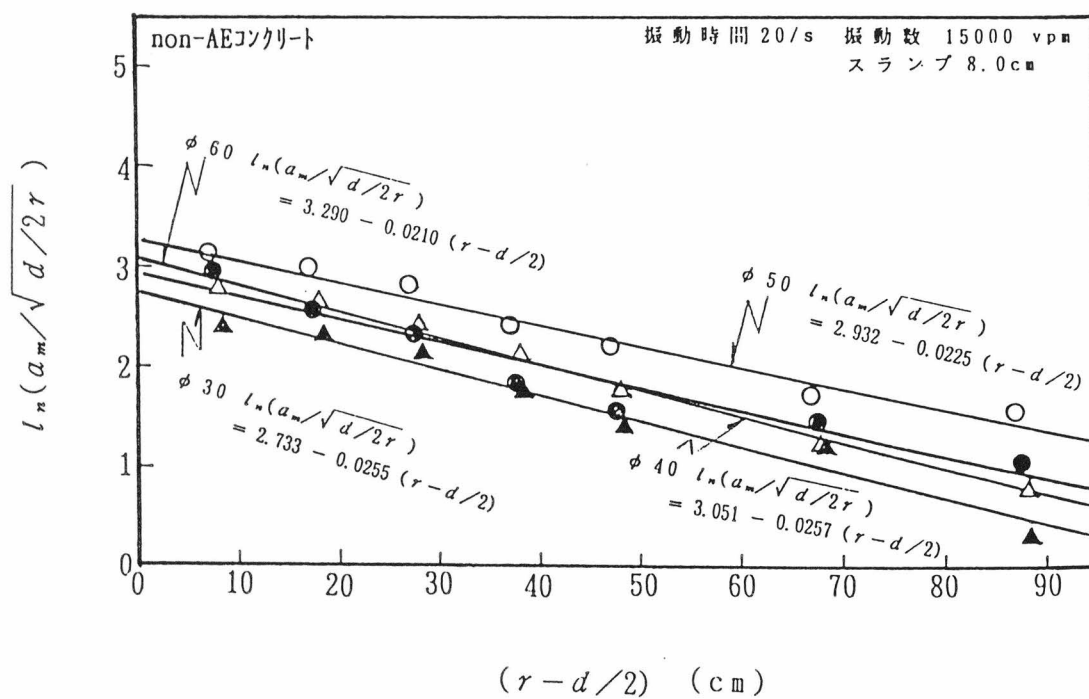


振動数 f : 150 (Hz)

伝播距離と加速度振幅の実験結果(non-AEコンクリート)

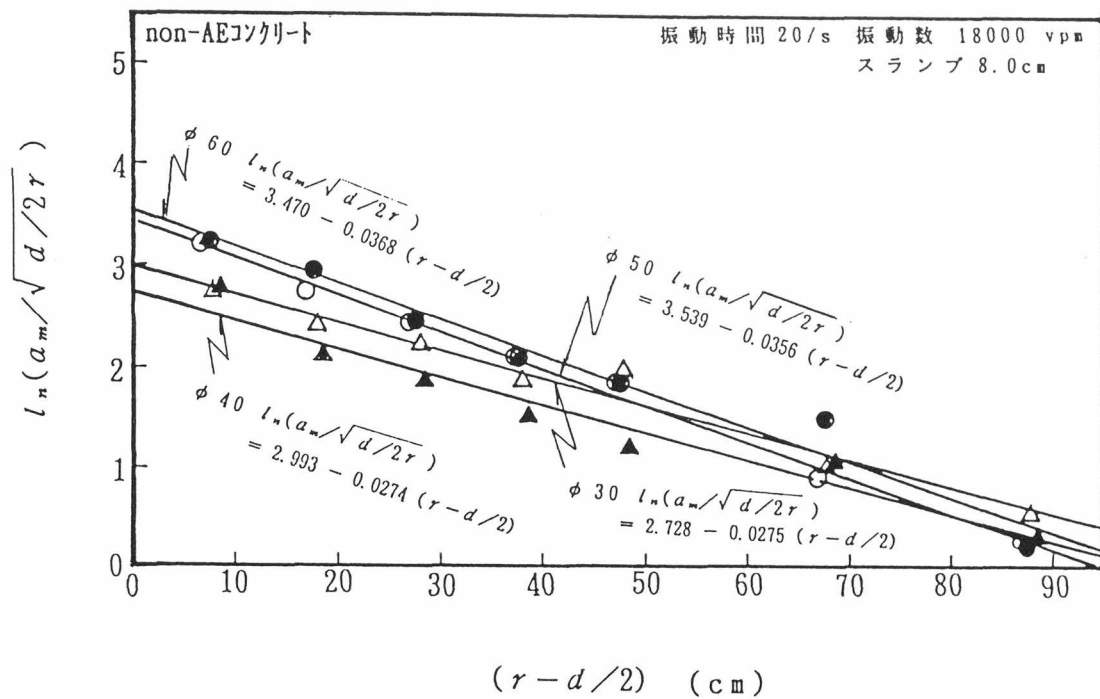


振動数 f : 200 (Hz)



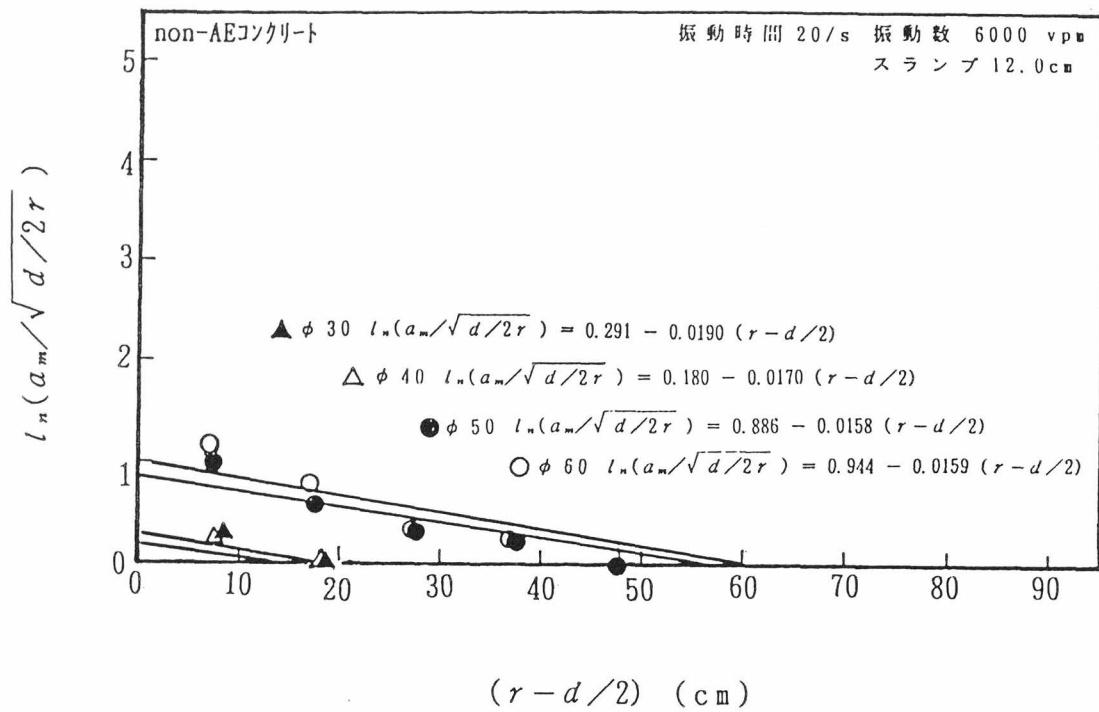
振動数 f : 250 (Hz)

伝播距離と加速度振幅の実験結果(non-AEコンクリート)

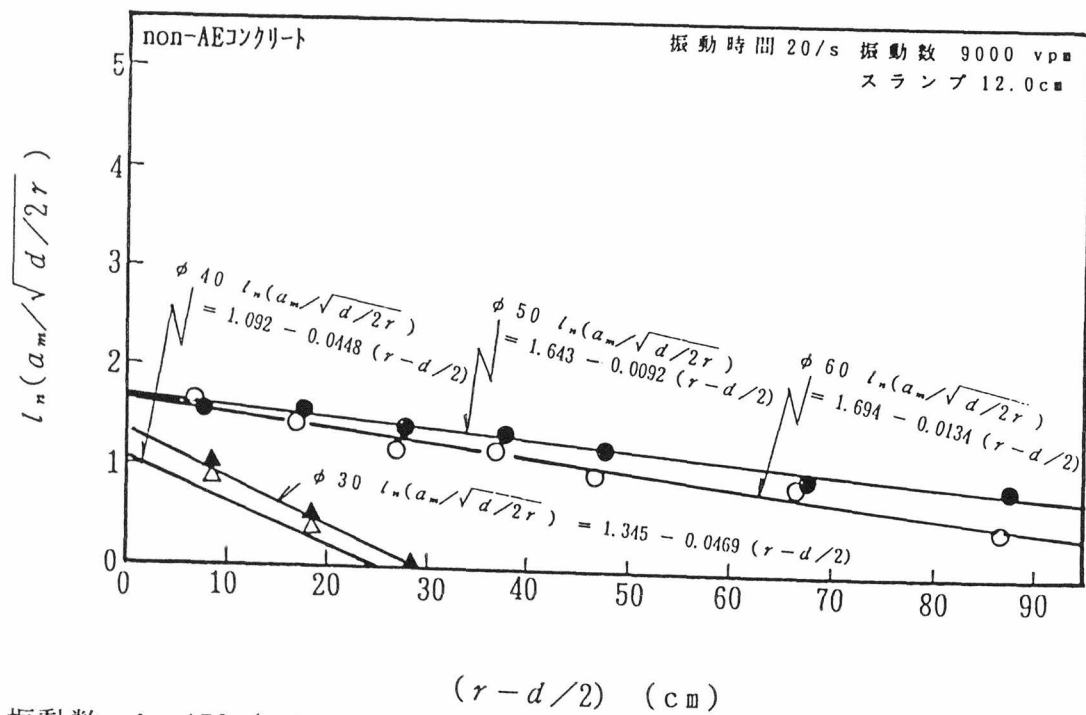


振動数 f : 300 (Hz)

伝播距離と加速度振幅の実験結果 (non-AEコンクリート)

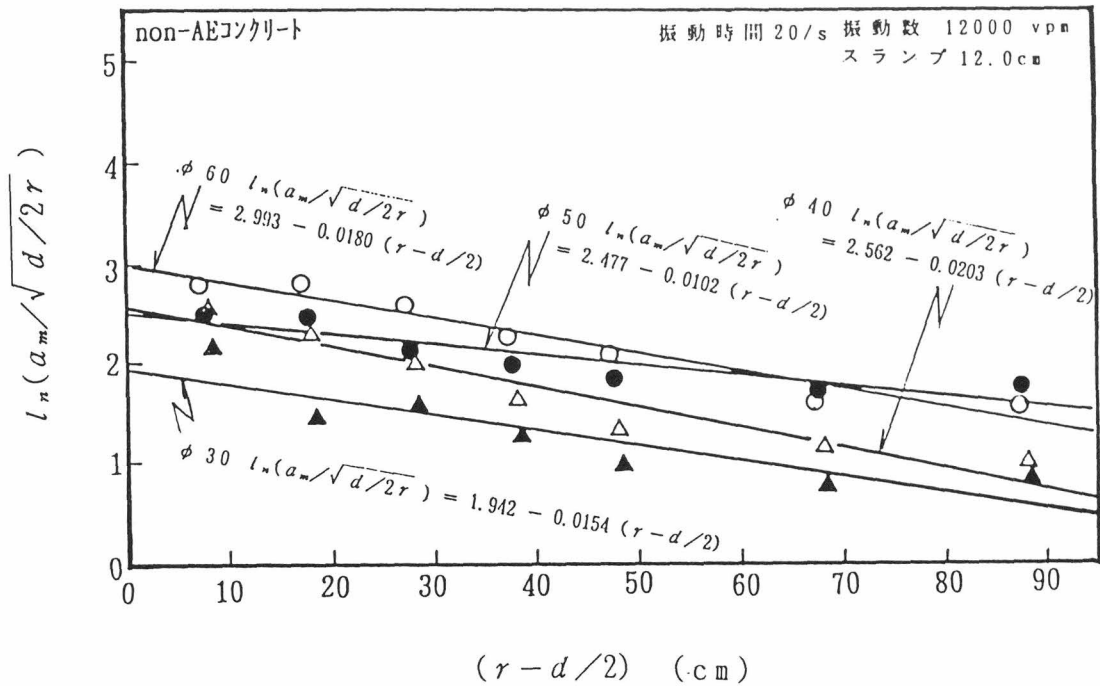


振動数 f : 100 (Hz)

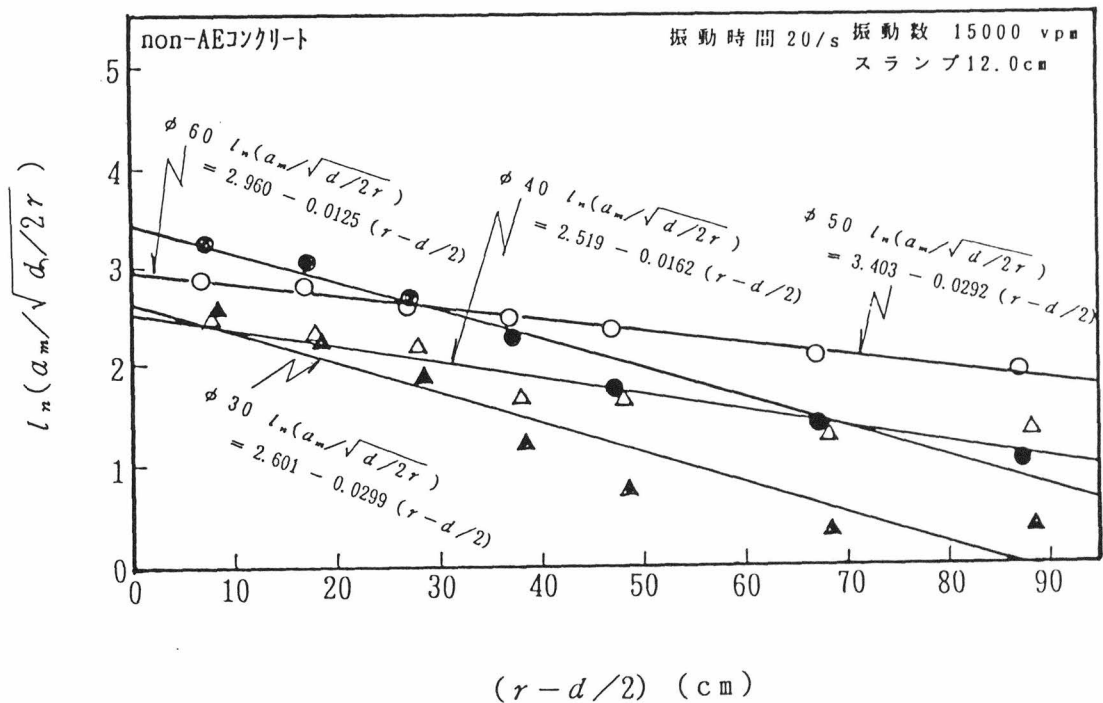


振動数 f : 150 (Hz)

伝播距離と加速度振幅の実験結果(non-AEコンクリート)

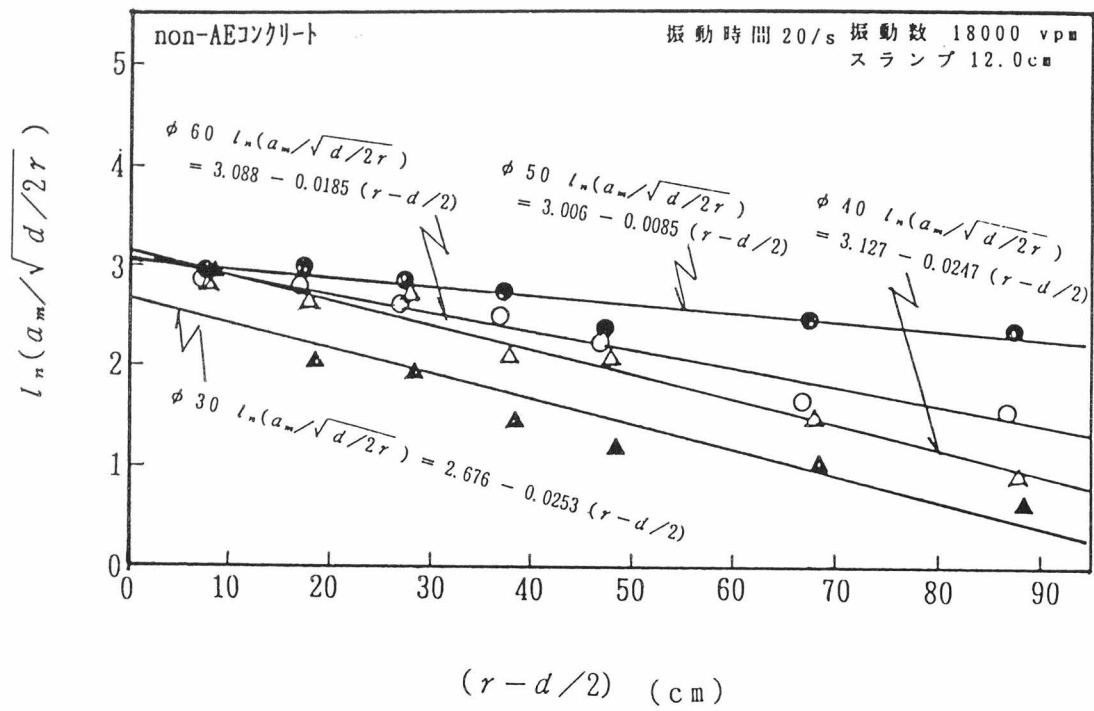


振動数 f : 200 (Hz)



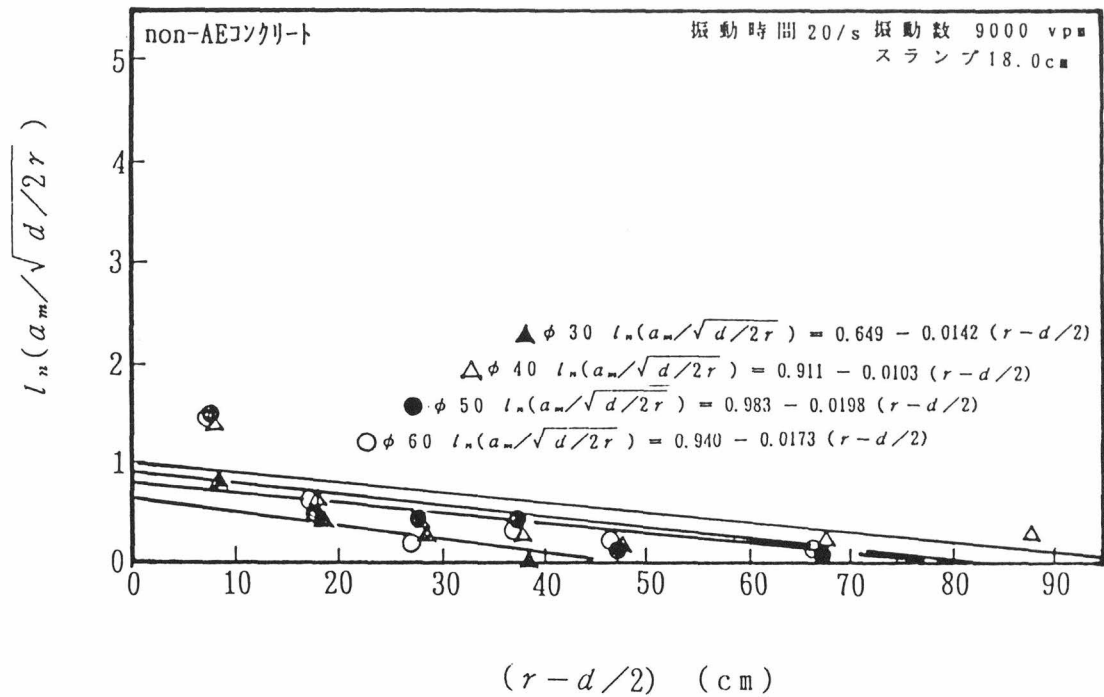
振動数 f : 250 (Hz)

伝播距離と加速度振幅の実験結果(non-AEコンクリート)

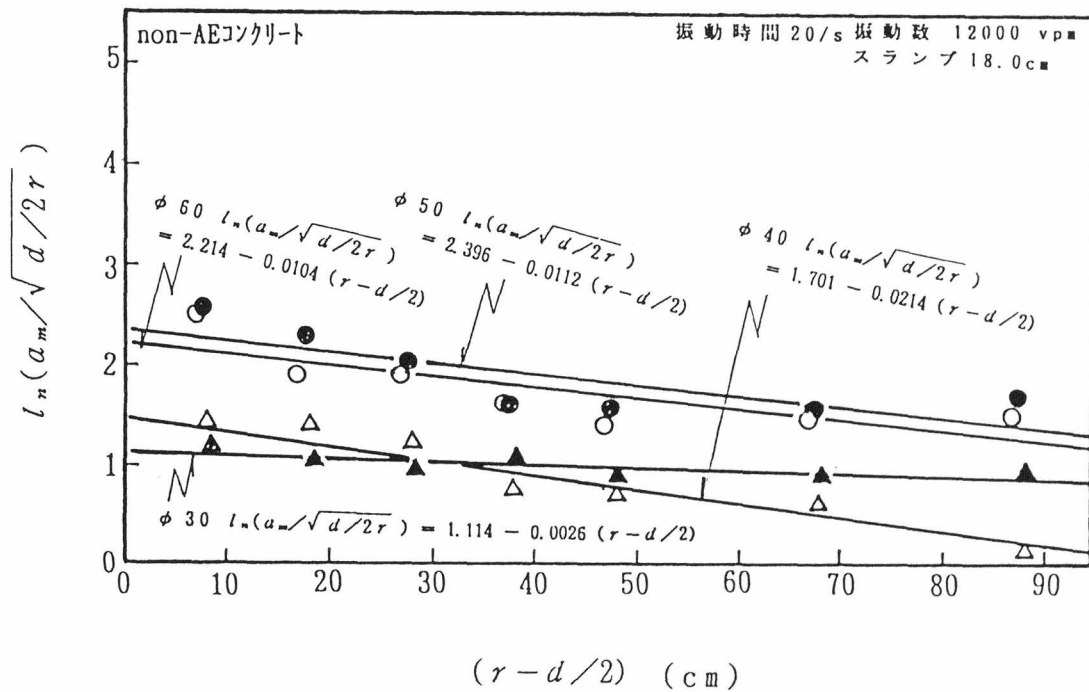


振動数 f : 300 (Hz)

伝播距離と加速度振幅の実験結果 (non-AEコンクリート)

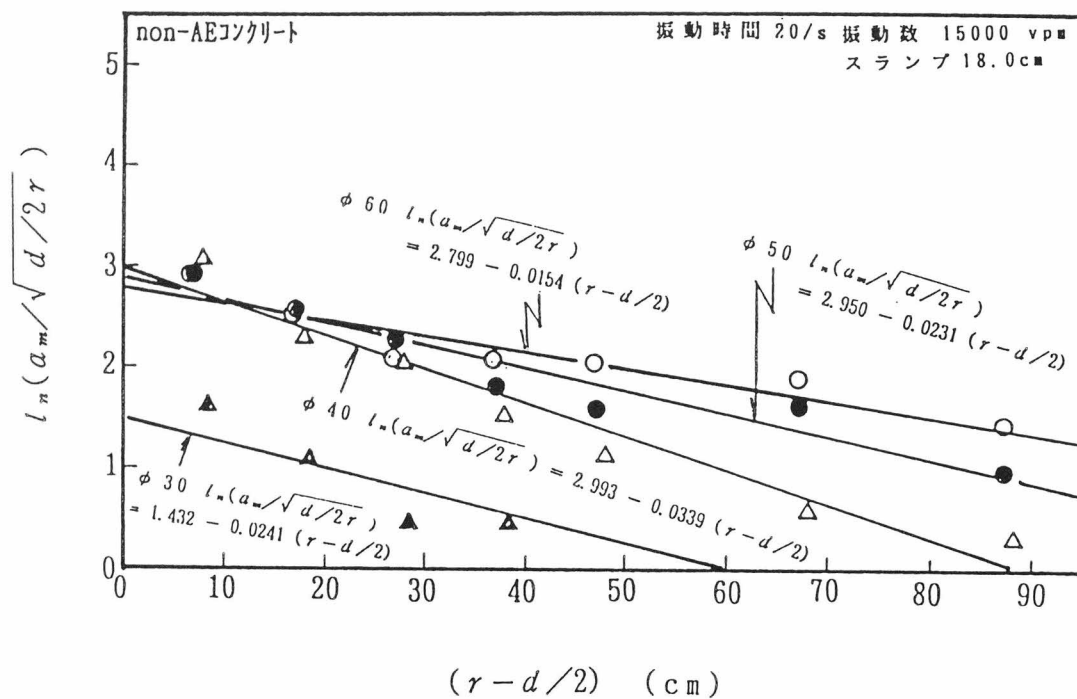


振動数 f : 150 (Hz)

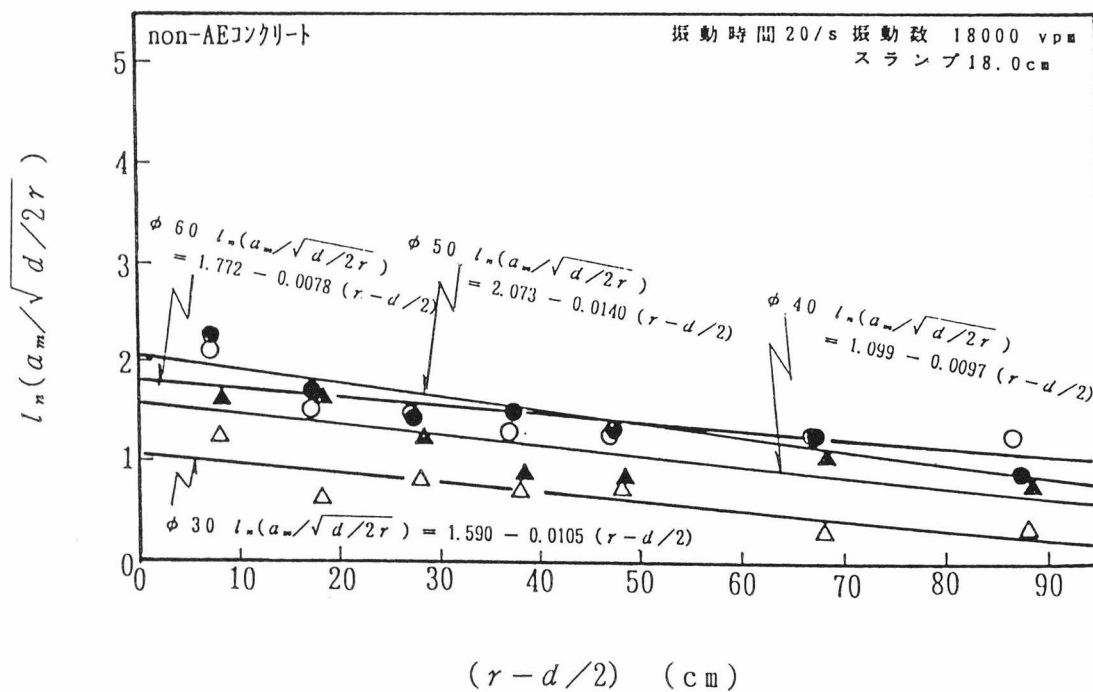


振動数 f : 200 (Hz)

伝播距離と加速度振幅の実験結果(non-AEコンクリート)

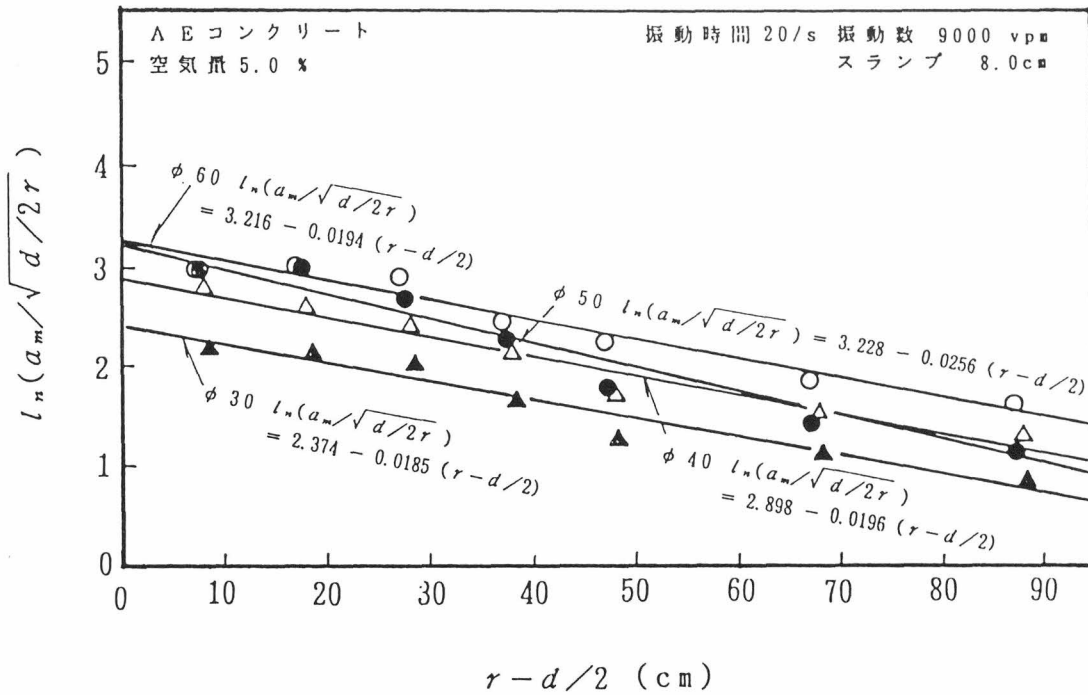


振動数 f : 250 (Hz)

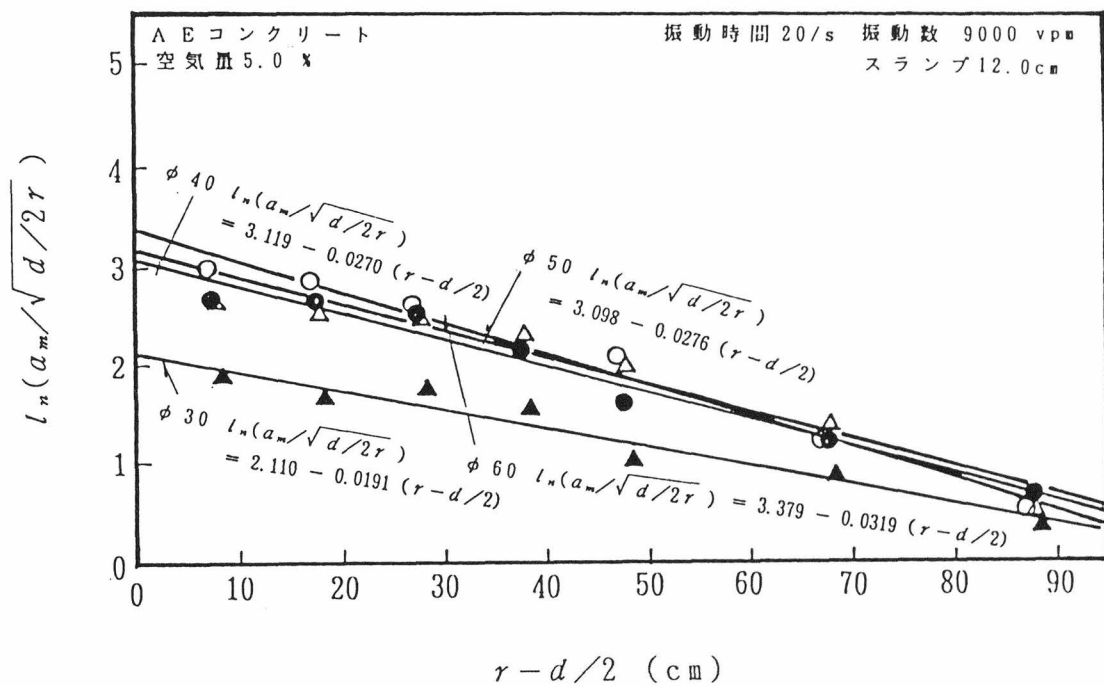


振動数 f : 300 (Hz)

伝播距離と加速度振幅の実験結果(A Eコンクリート)

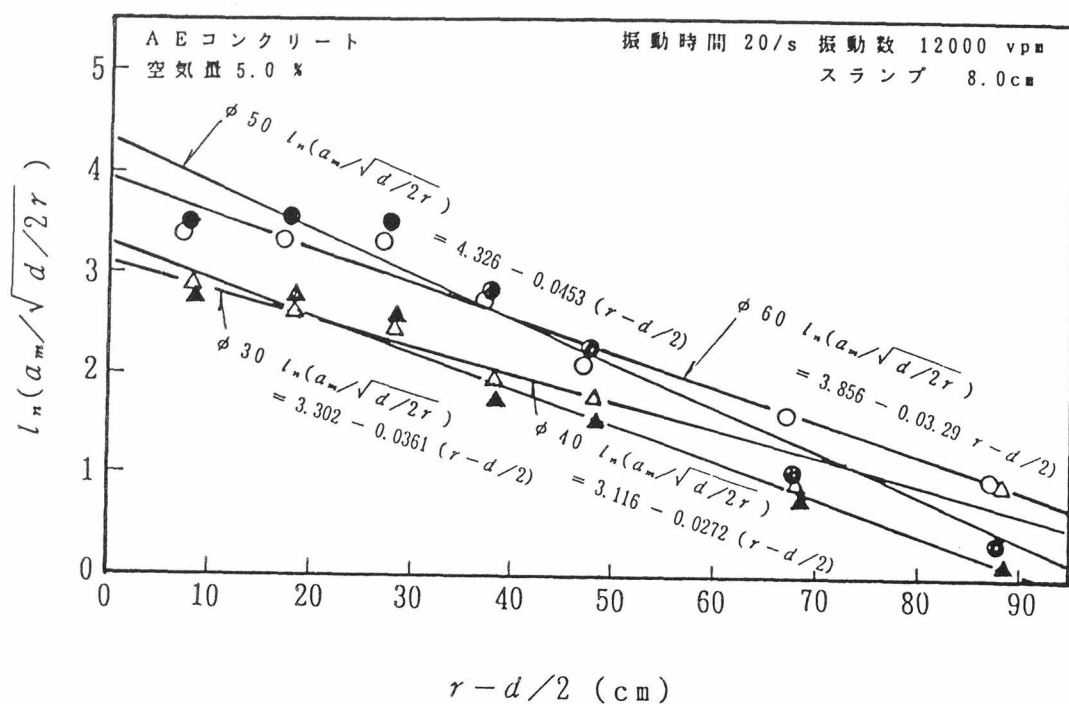


振動数 f : 150 (Hz)

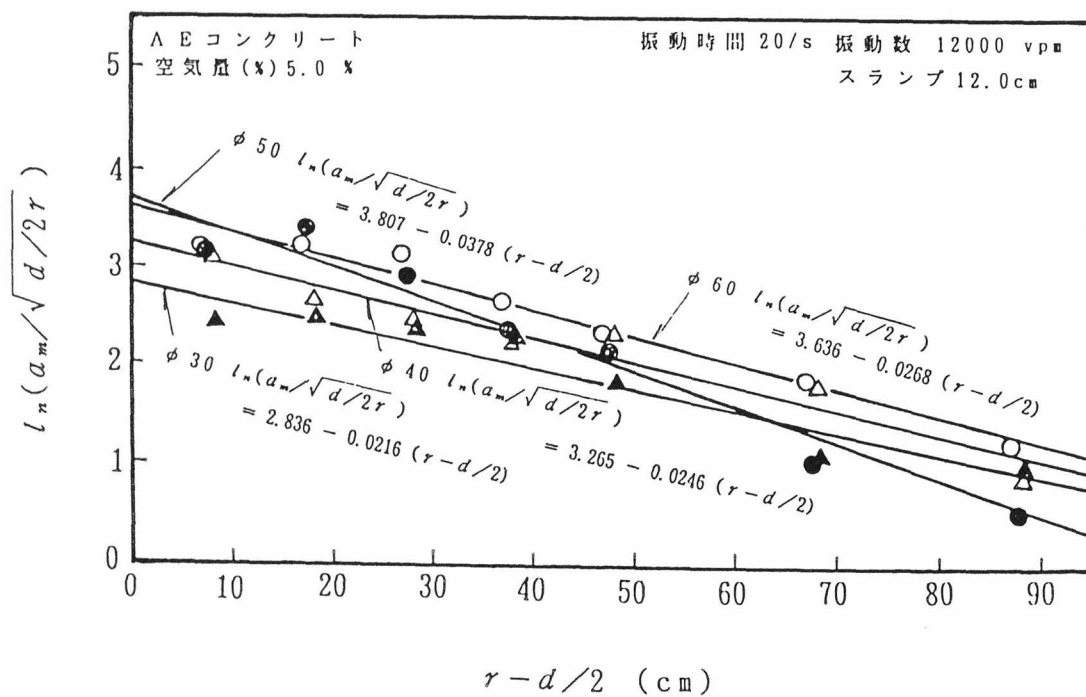


振動数 f : 150 (Hz)

伝播距離と加速度振幅の実験結果(A E コンクリート)



振動数 f : 200 (Hz)



振動数 f : 200 (Hz)

5.6 高性能減水剤を用いたコンクリートの特性¹⁵⁹⁾

5.6.1 実験概要

(1) コンクリートの性質と種類

実験に使用したコンクリートの性質と種類は、表 5.9 に示す10種類であって、その種類は以下のとおりである。

- 1) 通常コンクリート (PL=Plain Concrete/ non-AE コンクリート)
- 2) 高性能減水剤コンクリート (SP=Superplasticizer Concrete)
- 3) AE コンクリート (AE=Air Entrained Concrete)
- 4) 高性能AE減水剤コンクリート〔ナフタリン系〕 (AE+SP Concrete)

表 5.9 コンクリートの性質

コンクリートの性質	最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	Air (%)	W/C (%)	s / a (%)
non-AE コンクリート	20	4.0	2.0	55.0	46.0
		8.0			
		12.0			
		18.0			
高性能減水剤		4.0	2.0		
AEコンクリート		4.0	4.0		
高性能 AE減水剤		4.0	4.0		
		8.0			
		12.0			
		18.0			

(2) 実験方法

実験は、床版状コンクリートの締固めを目的として、200×200×25cmの鋼製型枠にコンクリートを敷き詰め、床版の中心に内部振動機(振動数12000vpm, 振動筒径φ50mm)を挿入した。

5.6.2 高性能減水剤コンクリートの締固めに対する性質

(1) 締固めによる各種コンクリートの表面性状の変化

コンクリートの性質や種類が変わった場合でも締固めによるコンクリート表面にはブリージング水が発生する。そこで、浮水の発生領域（以下ブリージング域と称する）を測定し、その半径 r_w を振動機の有効範囲を表す目安の一つとした。

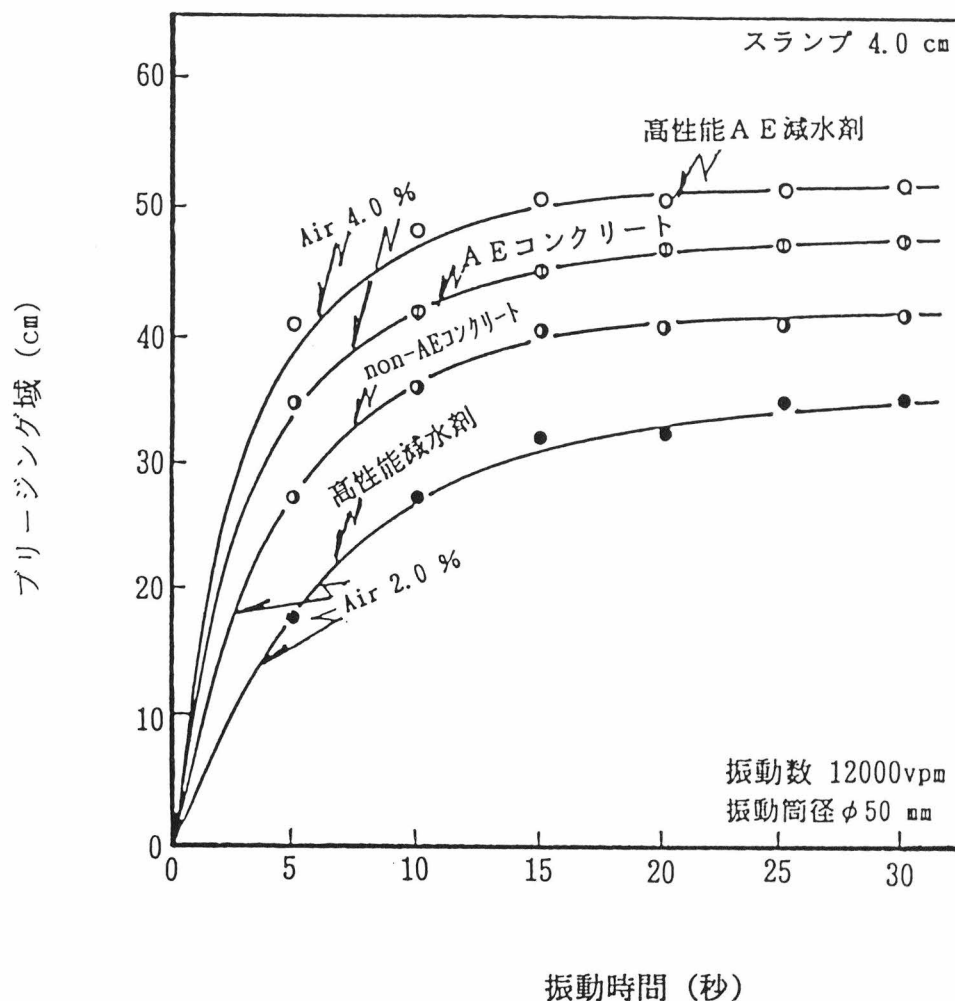


図-5.24 ブリージング域と振動締固め時間との関係

図-5.24 は、振動機 12000vpm 振動筒径 $\phi 50\text{mm}$ の内部振動機を用いて 30秒間締固めたときのスランプ 4.0cm のコンクリート表面の性状変化を示した。30秒間締固めた後のコンクリート表面のブリージング域の

順位は、1) 高性能A E減水剤コンクリート = 52cm、2) A Eコンクリート = 48cm、3) 通常コンクリート = 42.0cm、4) 高性能減水剤コンクリート = 38.0cm の順になっていて、空気量 4.0% 混入した高性能A E減水剤コンクリート有効範囲が最も大きくなっていることがわかる。

一方、高性能減水剤コンクリートは振動開始 5秒間では、他のコンクリートの種類のブリージング域の約 40~60% にすぎず振動時間 20秒で通常コンクリートより20%程小さくなっている。この高性能減水剤コンクリートにA E補助剤を混入することによりブリージング域は、振動時間 5秒で2倍、20秒では、1.5倍となっていることがわかる。

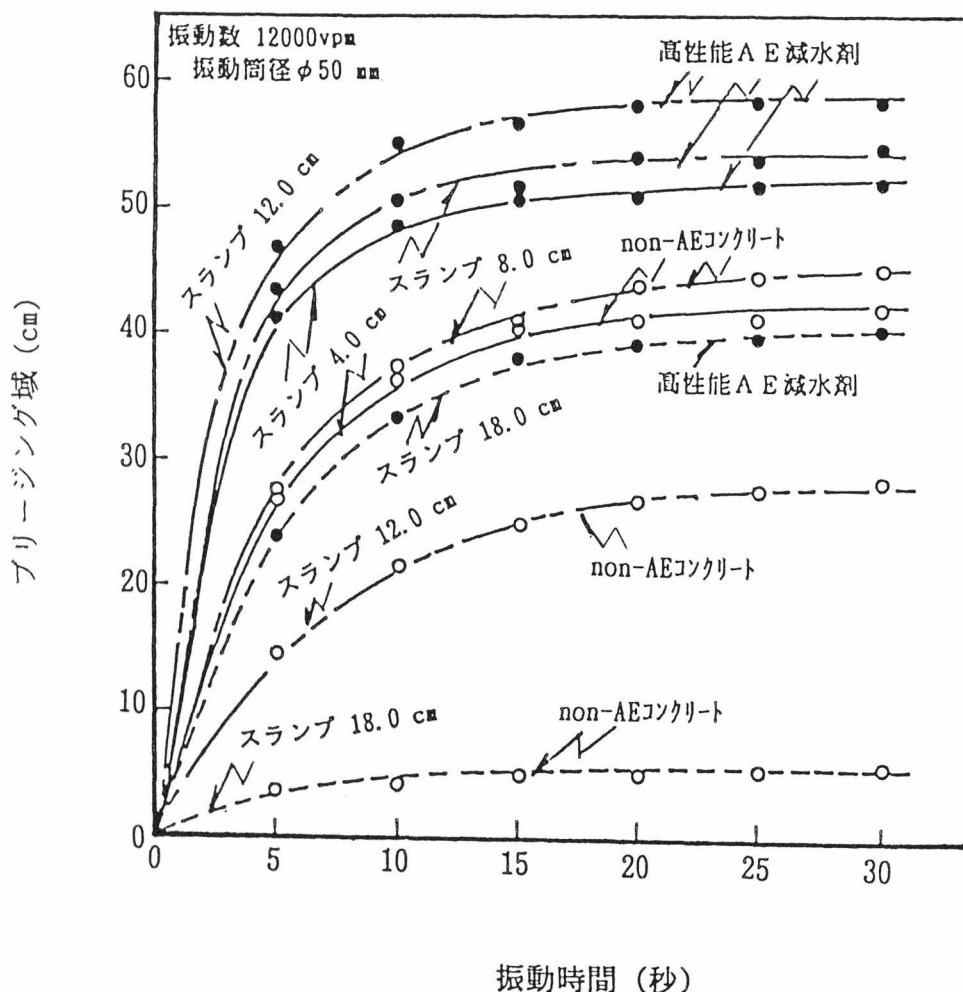


図-5.25 ブリージング域と振動締固め時間との関係

図-5.25 は、高性能減水剤コンクリートに空気量 4.0%を混入した高性能 A E 減水剤と通常コンクリート用いて、各々のコンクリートのスランプが 4.0cm, 8.0cm, 12.0cm および 18.0cm に変えて締固めたコンクリートの作用半径を図示したものである。実験結果は、スランプ12.0cm の高性能 A E 減水剤コンクリートが 58cm で最大であり、次に、スランプ 8.0cm で 54cm、スランプ 4.0cm で 52cm の順になっている。

しかし、スランプが 18.0cm の場合には、高性能 A E 減水剤コンクリートは、通常コンクリートのスランプ 4.0cm と 8.0cm よりも作用半径が小さくなっている。全体を注視すると、最も広い有効範囲を示したスランプ 12.0cm の高性能 A E 減水剤コンクリートは締固め初期で最大値の 80%になっていて、4.0cm, 8.0cm とスランプが相違したときでも高性能 A E 減水剤コンクリートは締固め初期のブリージング域は、最終値のほぼ、80%に達していることから、スランプの値が変化しても高性能減水剤を用いたコンクリートに空気を混入することによって締固めが短期間に進行し、締固めによる有効範囲も通常コンクリートよりもかなり広がったことがわかる。

(2) コンクリートの強度と単位容積質量におよぼす締固めの影響

スランプが4.0cmのコンクリートについて、締固めた床版から採取したコア供試体を平均した圧縮強度と振動機の中心からの距離との関係を示したのが図-5.26である。スランプの値を4.0cmと一定とし、コンクリートの種類を変えた結果がこの図であって、コンクリートの種類と振動機の距離によって強度の差が生じている。高性能 A E 減水剤コンクリートは、A E コンクリートと同じ傾向にあるが、振動機の中心から30cm～70cm の範囲で強度が10～25kgf/cm² 程度高くなっていて80cmを過ぎると等しくなっていることから A E コンクリートと同程度あるいはそれ以上の締固め効果があったものと思われる。しかし、空気を混入していない高性能減水剤コンクリートの強度は振動機から40cm 付近で 20kgf/cm² 程大きくなっているがその後は減少していて、振動機から80cm を過ぎたところで通常コンクリートの強度とほぼ等しくなっている。このことは、空気を混入しない高性能減水剤コンクリートは、通常コンクリートと同様に振動機の有効範囲が小さい傾向にあることを強度の上からも示している。

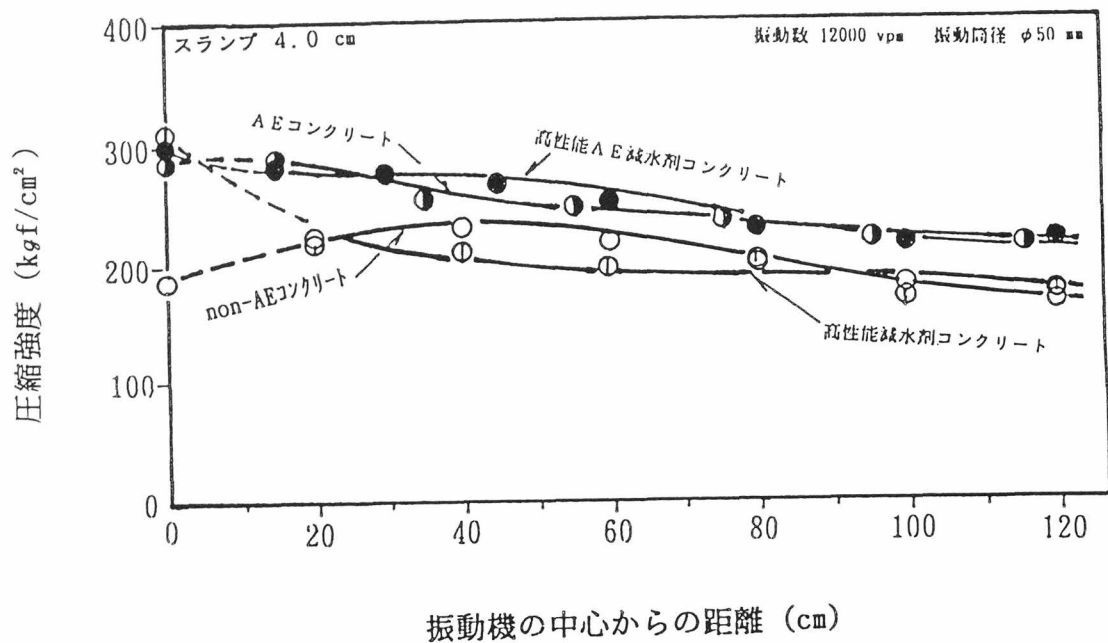


図-5.26 振動機を中心からの例とコンクリートの圧縮強度

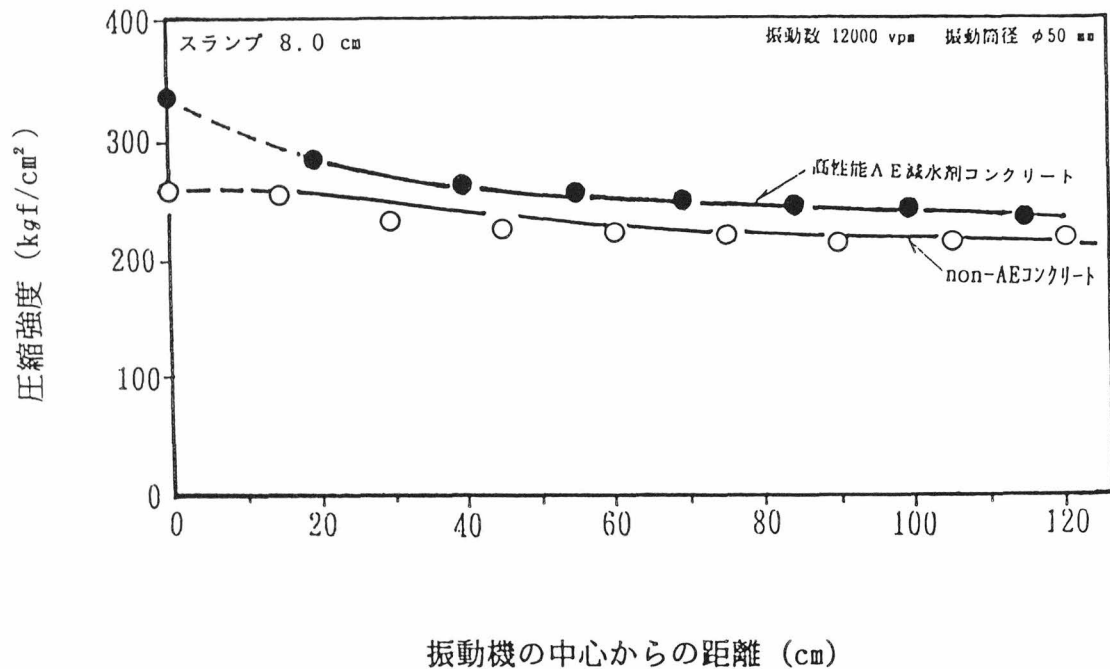


図-5.27 圧縮強度と振動機を中心からの距離との関係

高性能減水剤コンクリートに空気を混入することによって振動締固めによる有効範囲が通常コンクリートおよびA Eコンクリートよりも拡大されることがこれまでの実験結果から立証することができたので、高性能減水剤を使用したコンクリートにA E補助剤を混入した高性能A E減水剤コンクリートの締固めによる圧縮強度と通常コンクリートの関係について図示したのが図-5.27 である。

図-5.27 は、スランプを 8.0cm と一定した場合であるが、振動機付近での締固めによる強度の差が生じているが、振動機の中心から30cm～40cmを過ぎた位置からの強度は締固めによる強度の影響を受けていないことがわかる。しかし、このような状態でも高性能A E減水剤コンクリートは通常コンクリートに比較してやや大きい強度を示している。

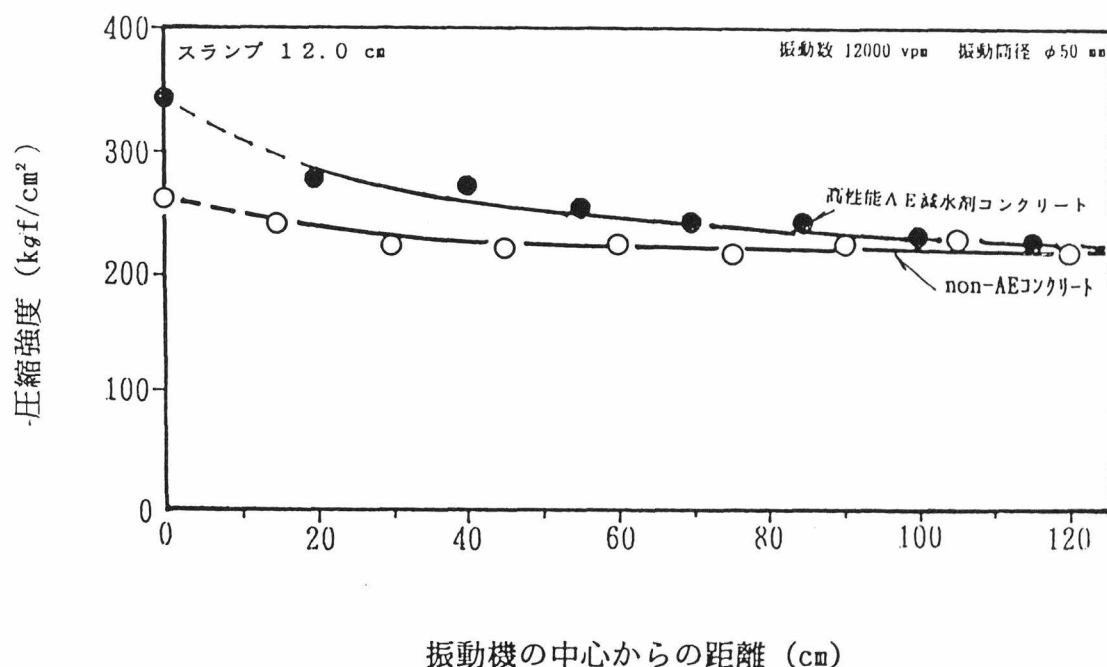
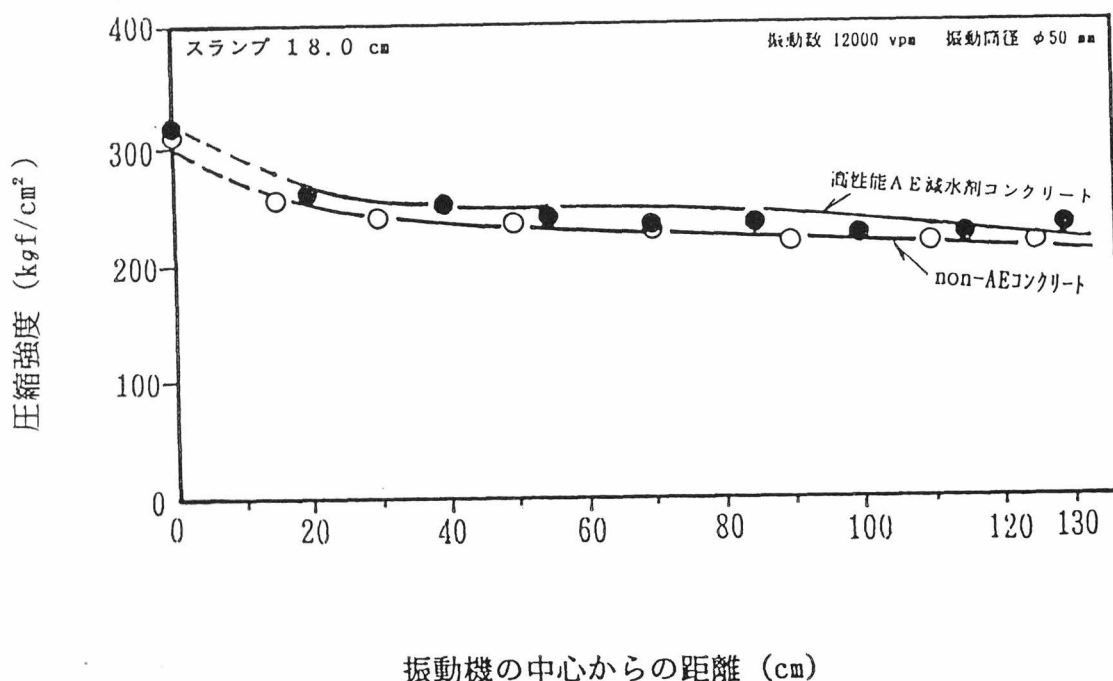


図-5.28 圧縮強度と振動機の中心からの距離との関係

振動締固めによる有効範囲は、コンクリートの性質に顕著に現れることから、コンクリートのスランプを 12.0cm としたときの高性能A E減水剤コンクリートと通常コンクリートの強度について図示したのが、図

ー5.28である。高性能A E減水剤コンクリートと通常コンクリートの関係は、振動機を中心から 40cm 付近で生じていて通常コンクリートに比べて、高性能A E減水剤コンクリートの強度が 30～40 (kgf/cm²) 程度大きくなっているが、振動機を中心から離れるに従って強度の差は小さくなって入る。このことは、高性能A E減水剤コンクリートにおいても通常コンクリート同様にある締固め範囲をすぎると振動による効果が期待できないことがわかる。



図ー5.29 圧縮強度と振動機を中心からの距離との関係

さらに、コンクリートのスランプを 18.0cm と変えて締固めた高性能A E減水剤コンクリートと通常コンクリートの強度による有効範囲の関係を示したのが図ー5.29である。コンクリートのスランプが大きくなって軟練りコンクリートになってくると、高性能A E減水剤コンクリートおよび通常コンクリートにおいても締固めによる有効範囲とその効果は振動機付近 10cm 程度に限られていて、振動締固めによる振動機からの伝播が期待されないことを図ー5.29 は示しているものと考える。

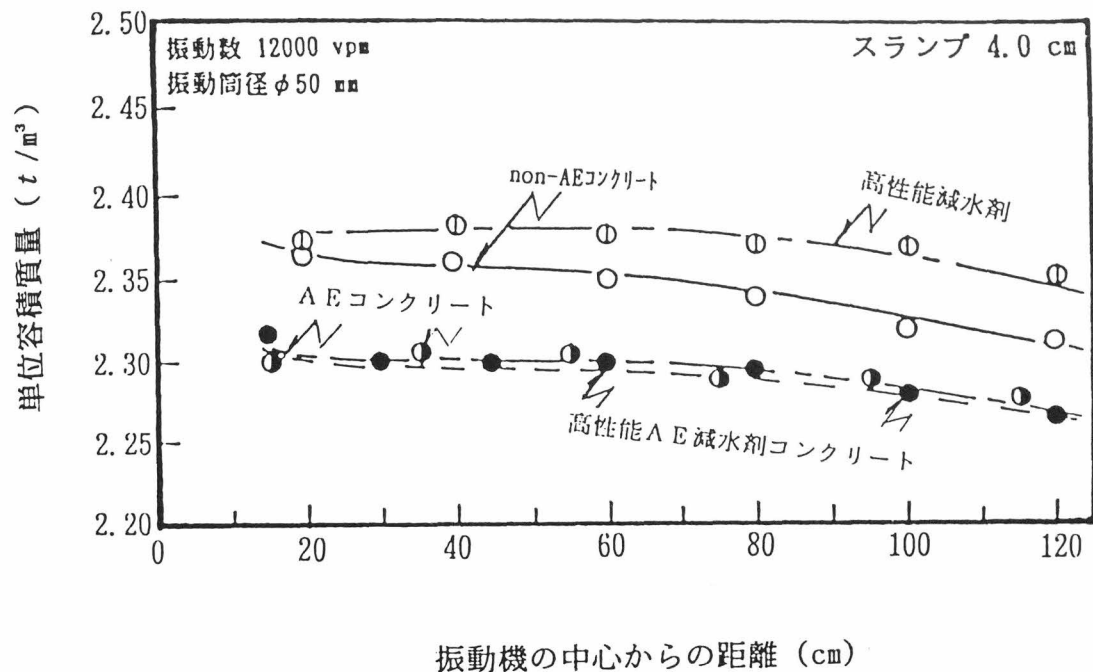


図-5.30 単位容積質量と振動機を中心からの距離との関係

次に、コンクリートの性質およびその種類が変わったときの締固めによる単位容積質量と振動機を中心からの距離との関係を示したのが図-5.30である。コンクリートのスランプを 4.0cm と一定にして、コンクリートの種類を通常コンクリート、AEコンクリート、高性能減水剤コンクリート および 高性能AE減水剤コンクリートの4種類とした。締固めた後の単位容積質量は、コンクリートの種類によって変化していて、通常コンクリートに対して高性能減水剤コンクリートが大きくなっている。振動機を中心位置から離れたところでも差はほぼ等しくなっている。

しかし、AEコンクリートおよび高性能AE減水剤コンクリートは、単位容積質量が約 $2.30(t/m^3)$ 以下の状態で同じ傾向を示し、振動機を中心から遠く離れるに従って減少していることがわかる。

また、スランプ 4.0cmのコンクリートの単位容積質量は、通常コンクリートおよび高性能減水剤コンクリートに差を生じるが、それに比較してAEコンクリートおよび高性能AE減水剤コンクリートの違いとの影響が小さくほぼ等しくなっている。

このことは、空気量の影響が直接的に関係して、空気が混入されない通常コンクリートおよび高性能減水剤コンクリートと空気が混入されたA Eコンクリートおよび高性能A E減水剤コンクリートに単位容積質量の相違が生じたものと考えられる。

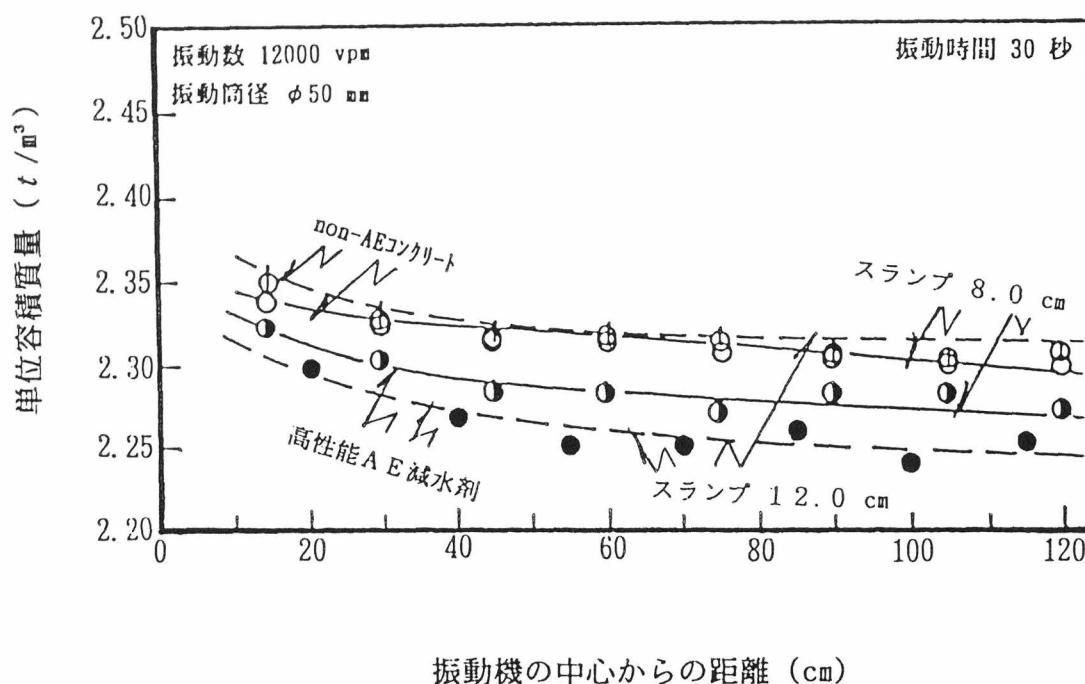


図-5.31 単位容積質量と振動機を中心からの距離との関係

図-5.31 は、スランプ 8.0cm と12.0cm の通常コンクリートおよび高性能A E減水剤コンクリートでは振動機からの距離がスランプ 8.0cmで約 45cm, スランプ12.0cm で約 55cm までの範囲で単位容積質量が大きく、通常コンクリートでは、スランプ 8.0cm で約 40cm, スランプ12.0cm で約45cm までの範囲で単位容積質量が大きくなっていて、ブリージング域からみた有効範囲の傾向と同様に通常コンクリートより高性能A E減水剤コンクリートが大きく、スランプ 8.0cm よりスランプ 12.0cm が大きい結果となっている。

さらに、スランプ 4.0cmおよびスランプ18.0cmのコンクリートのように、性質に変化がある場合の通常コンクリートと高性能A Eコンクリートの締固めによる単位容積質量について示したのが、図-5.32 である。

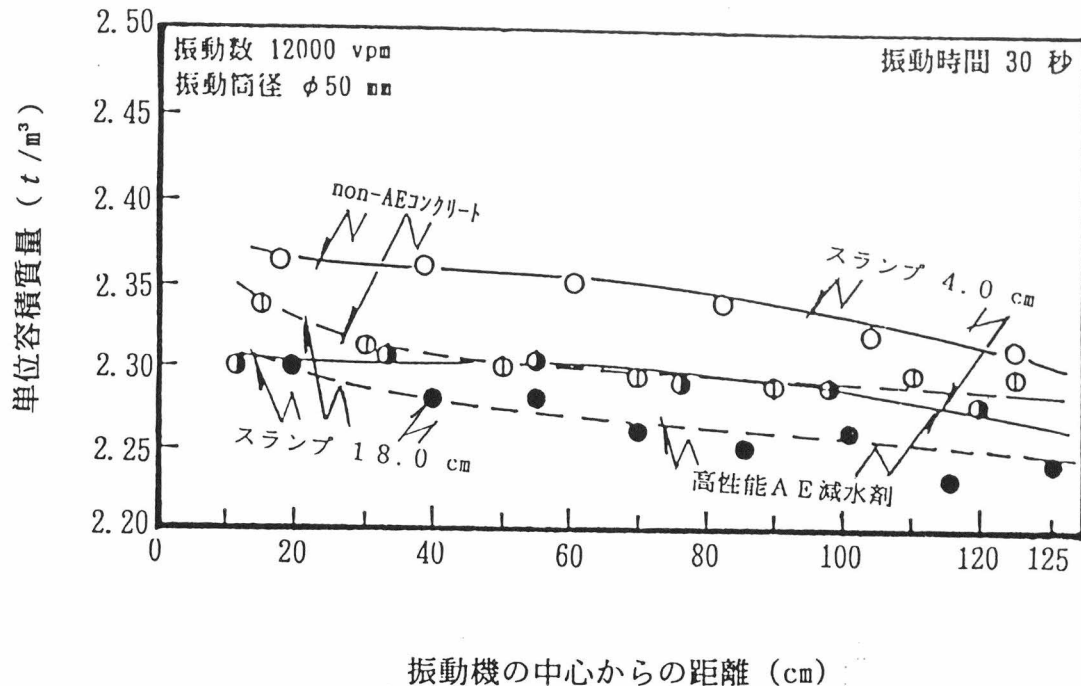


図-5.32 単位容積質量と振動機を中心からの距離との関係

スランプ 18.0cm の通常コンクリートの単位容積質量は、スランプ 4.0cm の高性能AE減水剤コンクリートと振動機を中心から 40cm~100 cm の位置ではほぼ等しい値を示しているが、コンクリートの性質と種類によつての相違を表しているが、スランプ 18.0cm の高性能AE減水剤コンクリートがより低い値を示していることは、締固めの性状変化がコンクリートの性質や種類によって生じることから振動締固めたコンクリートの単位容積質量にも影響があつて、この結果が得られたものと考えられる(図-5.32)。

5.6.3 振動締固め中の振動伝播と減衰係数についての考察

(1) 振動機の筒表面位置での加速度振幅と減衰係数との関係

振動機からコンクリートへの振動の伝達率と伝播中における減衰係数の算定方法¹⁵⁵⁾および第4章による結果の解析方法によつて、高性能減水剤を用いたコンクリートの振動機からコンクリート中への振動伝播による伝達率と減衰係数について検討した。

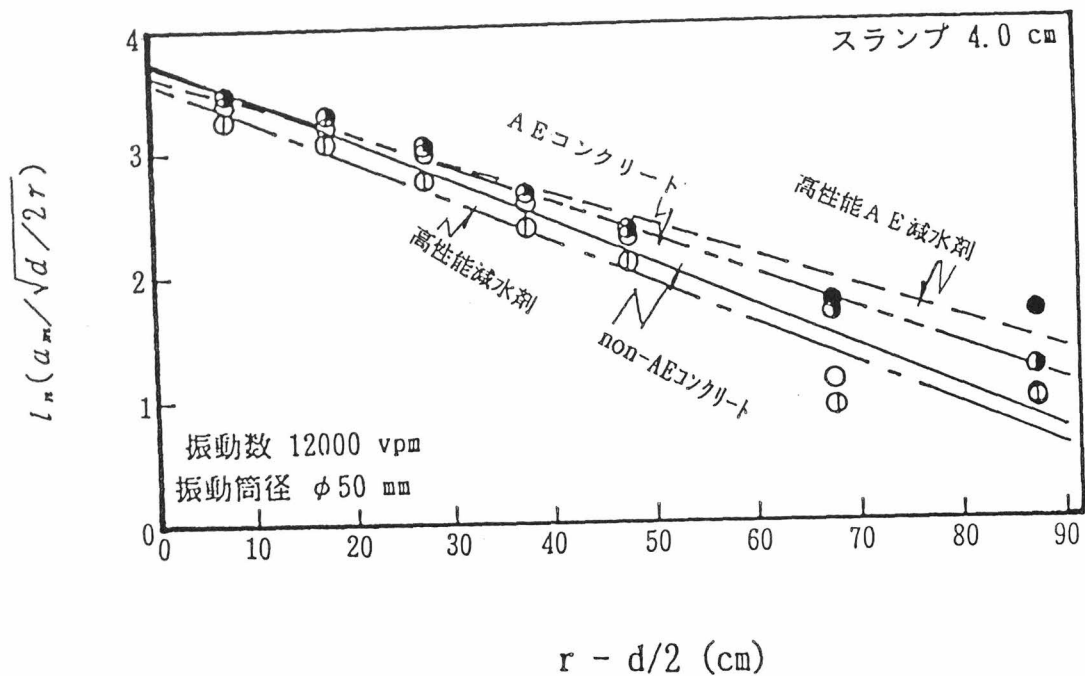


図-5.33 加速度振幅と振動機からの距離との関係

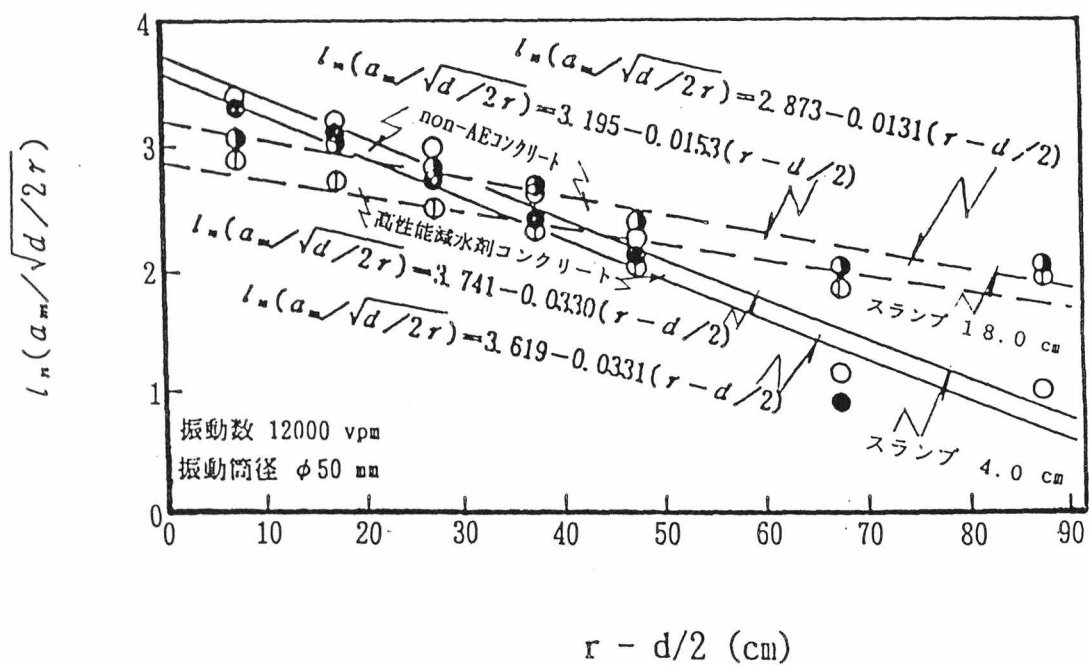


図-5.34 加速度振幅と振動機からの距離との関係

図-5.33 は、スランプ 4.0cm と一定にしたコンクリートの種類について加速度振幅と振動機を中心からの距離との関係を示した。コンクリートの種類によって、線形の傾向は相違しており、空気が混入されている A E コンクリートおよび高性能 A E 減水剤コンクリートの形状が他のコンクリートよりも振動機を中心からの距離が遠くなっても加速度振幅の値が大きくなっている。その順列は、高性能 A E 減水剤コンクリート、A E コンクリート、通常コンクリートおよび高性能減水剤コンクリートの順になっていることがわかる。なお、実験結果から得られたコンクリート中の加速度振幅の値を表 5.10 に示した。

表 5.10 加速度振幅と振動機からの距離との関係

スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリートの性質	加速度振幅 (g)						
			振動機中心からの距離 (cm)						
			10	20	30	40	50	70	90
4.0	2.0	Plain	14.52	8.46	5.51	3.42	2.18	0.58	0.46
	2.0	SP	13.72	8.01	4.69	2.73	1.86	0.48	0.45
	4.0	AE	15.04	9.02	5.88	3.57	2.24	0.98	0.55
	4.0	SP・AE	15.28	9.95	6.06	3.83	2.49	1.04	0.87
8.0	2.0	Plain	13.36	7.65	4.24	2.53	1.89	1.06	0.54
	4.0	SP・AE	15.07	10.26	6.56	3.67	2.64	1.16	0.58
12.0	2.0	Plain	11.51	6.73	3.72	2.73	1.90	0.87	0.65
	4.0	SP・AE	13.25	7.97	4.89	3.61	2.57	1.11	0.58
18.0	2.0	Plain	8.95	5.46	3.52	2.55	1.70	1.20	1.18
	4.0	SP・AE	10.58	7.19	4.78	3.61	2.35	1.39	1.24

また、図-5.34 は、スランプ 4.0cm と 18.0cm の通常コンクリートおよび高性能減水剤コンクリートについて図示したものである。コンクリートの性質がスランプ 4.0cm と 18.0cm での締固めによる差異が顕著に生じていて振動締固めによる特性をこの解析結果はよく表現しているものとする。さらに、これらの実験結果の相関係数は、0.921~0.990 の範囲にあることから高い直線関係を示していると考えられる。

この直線から各種コンクリートについての振動機特性として、振動機の振動筒表面の位置の加速度振幅 a_o 、振動機自体の加速度振幅 a_v 、伝達率 R_t および減衰係数 β の計算結果を表 5.11 に示した。

表 5.11 伝達率 R_t と減衰係数 β の実験結果

スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート の性質	a_o (g)	a_v (g)	R_t (%)	β (1/cm)
4.0	2.0	PL	42.15	73.42	57.41	0.0330
		SP	37.32	71.69	52.05	0.0331
	4.0	AE	41.19	71.15	57.89	0.0293
		AE+SP	39.16	58.60	66.83	0.0252
8.0	2.0	PL	31.18	77.15	40.42	0.0263
	4.0	AE+SP	44.12	77.25	57.11	0.0287
12.0	2.0	PL	26.47	71.40	37.07	0.0235
	4.0	AE+SP	35.14	73.00	48.14	0.0259
18.0	2.0	PL	17.68	73.95	23.91	0.0131
	4.0	AE+SP	24.40	69.70	35.01	0.0153

a_o : 振動機の表面位置での加速度振幅 (g)

a_v : コンクリート中の振動機の加速度振幅 (g)

R_t : 伝達率 $R_t = a_o / a_v$ (%)

β : 減衰係数 (1/cm)

(2) コンクリートの性質とその種類が伝達率と減衰係数におよぼす影響

図-5.35 は、実験結果から算出した表 5.11 の値を用いて、伝達率 R_t (%)とスランプ(cm)との関係を示したもので、高性能減水剤コンクリートに空気を混入させた高性能AE減水剤コンクリートは、通常コンクリートに比べて、1.2~1.5倍の伝達率を示し、スランプの値が大きくなるに従って伝達率は小さくなっている。

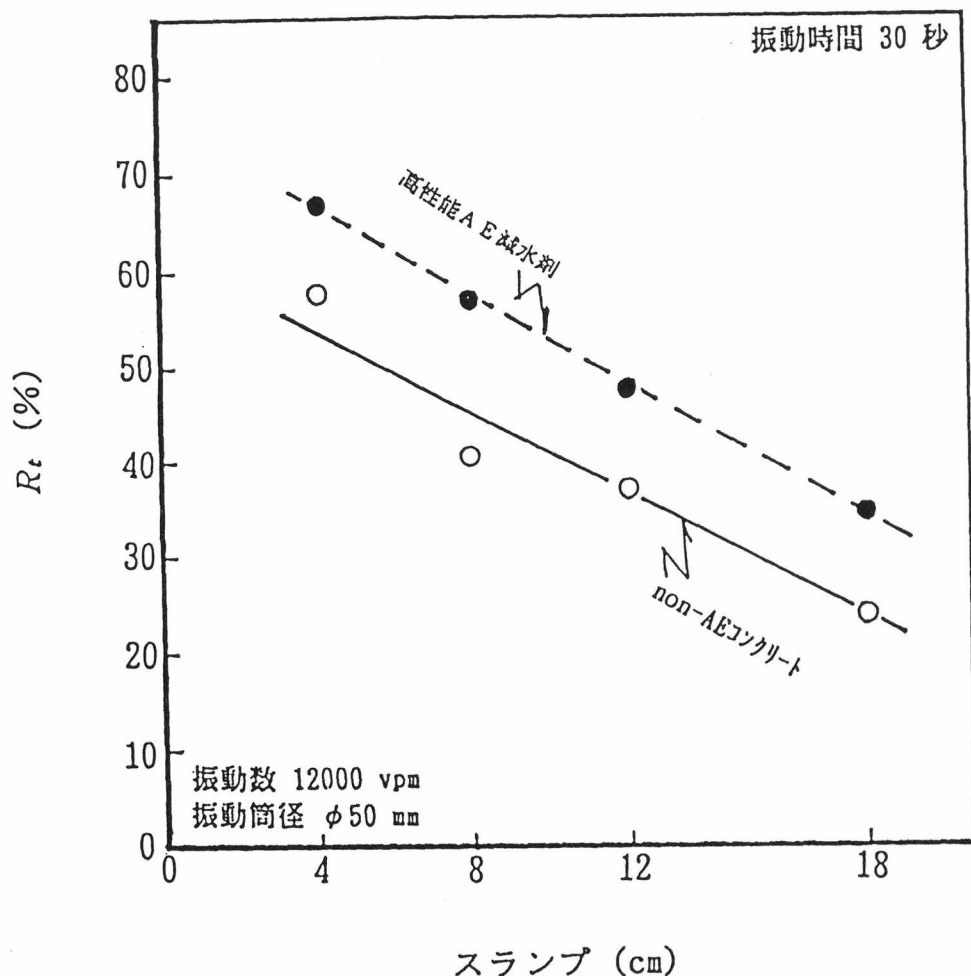


図-5.35 スランプと R_t との関係

このように、コンクリートのスランプが振動締固めに大きく影響することを図-5.35 は示している。また、スランプが 4.0cm の高性能 A E 減水剤コンクリートは、スランプ 12.0cm の同じ種類のコンクリートの伝達率の1.38倍にもなっていたことは硬練りコンクリート程、加速度振幅の伝達が大きくなることにある。

さらに、コンクリートの種類が異なる場合について伝達率を示したのが図-5.36である。空気を混入しない高性能減水剤コンクリートは、通常コンクリート、A Eおよび高性能 A E 減水剤コンクリートよりも伝達率は小さくなっていて、空気の混入量の影響と同様にコンクリートの種類が変わった場合でも締固め中の振動伝播に影響することがわかる。

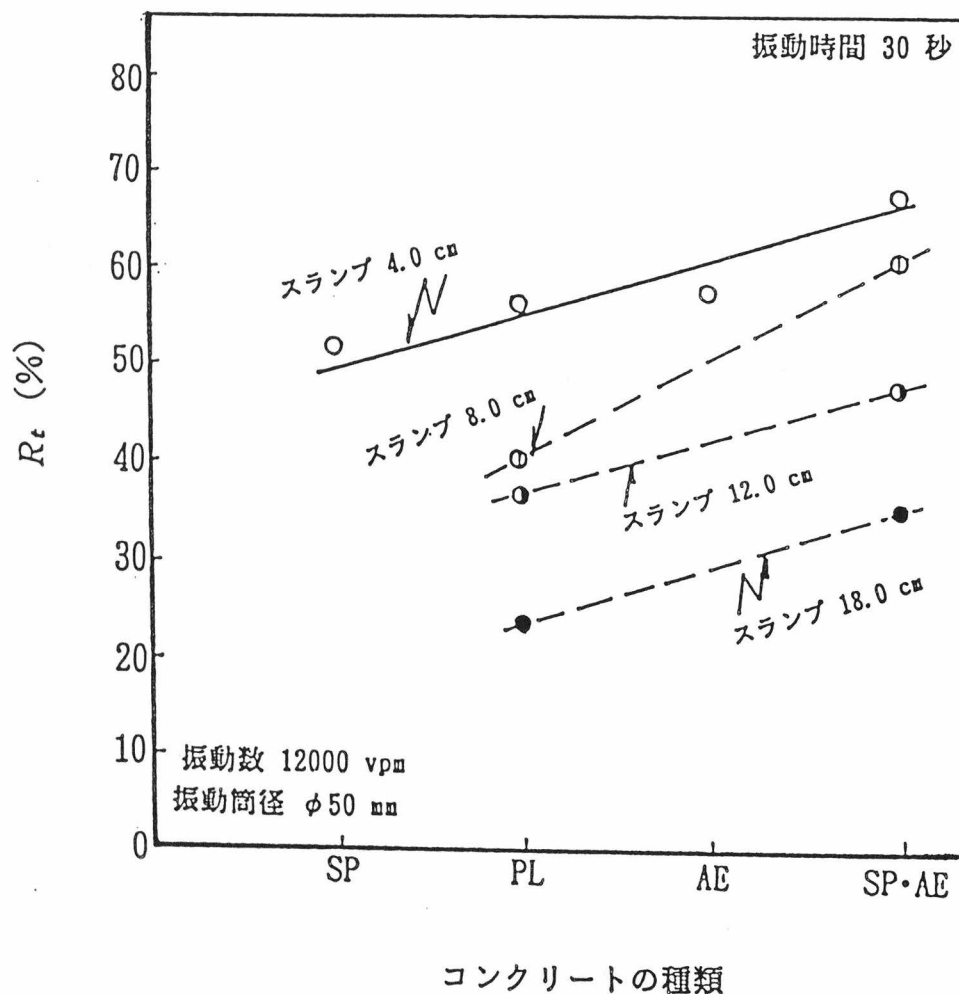


図-5.36 コンクリート種類と R_t との関係

図-5.33 および図-5.34 の実験結果の直線の傾きから算出した振動伝播の減衰係数 β とコンクリートのスランプとの関係を示したものが図-5.37 である。減衰係数は、スランプが 4.0cm から18.0cm になるに従って減少していることから、スランプが大きくなるにつれ振動伝播中の減衰は、小さくなることを証している。

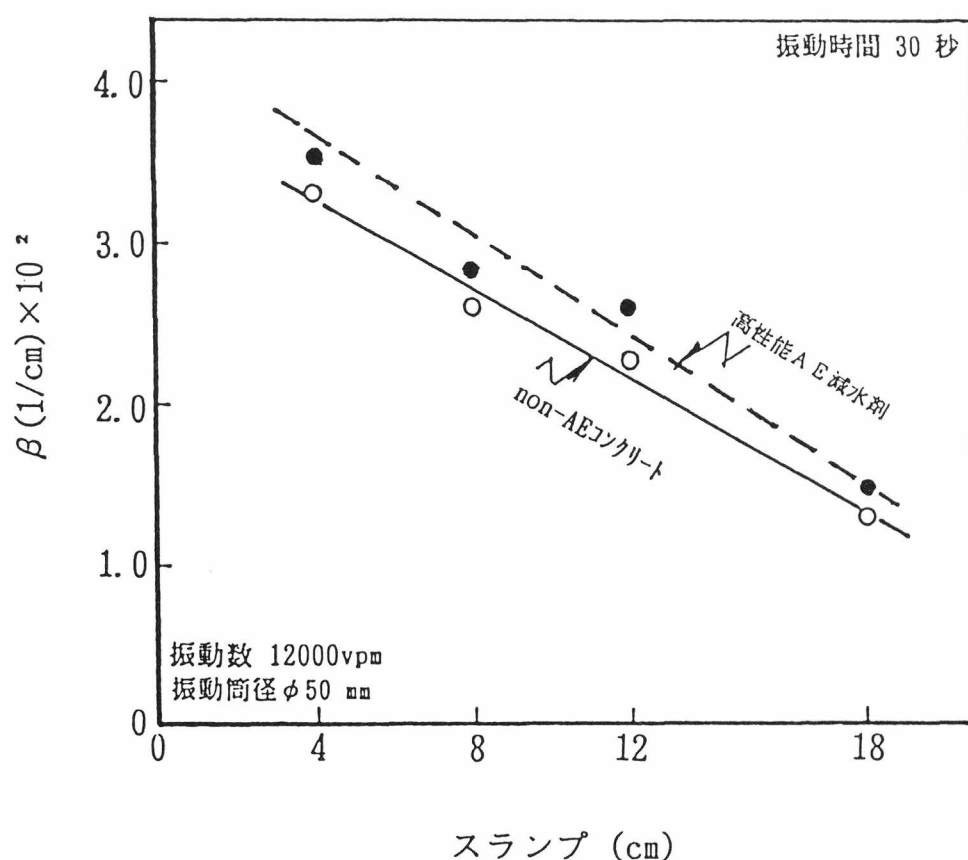


図-5.37 スランプと β との関係

また、前述のように、伝達率の優れていた高性能AE減水剤コンクリートは、通常コンクリートよりもやや減衰が大きくなる傾向にある。

各種コンクリートと減衰係数の関係を図-5.38 に示してあるが、スランプ4.0cmのA E、高性能A E減水剤コンクリートの減衰は、non-A Eコンクリートおよび高性能減水剤コンクリートよりも小さくなっているが、コンクリートの種類が変わるとその影響があって、前に述べたようにスランプ値が大きくなる程減衰は小さく、コンクリートの種類を考えると通常コンクリートの方が高性能A E減水剤コンクリートより減衰は大きくなっている。

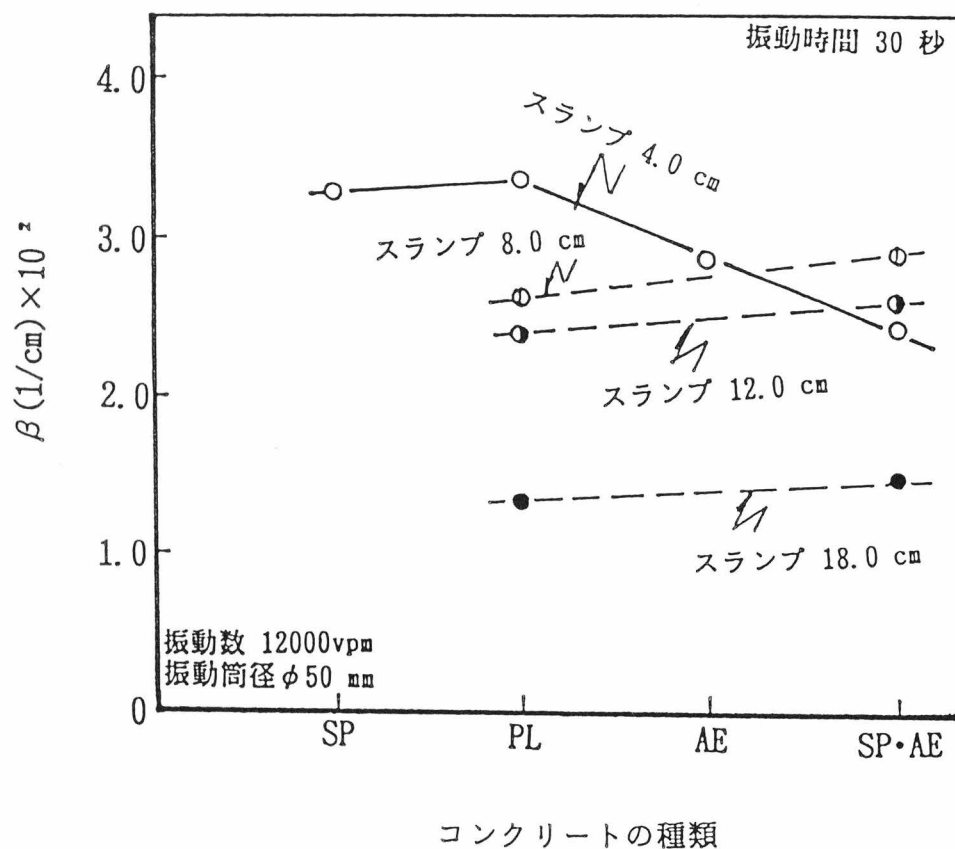


図-5.38 コンクリートの種類と β との関係

また、スランプ 4.0cm のA Eコンクリートとスランプ 8.0cm の高性能A E減水剤コンクリートの減衰係数の値がほぼ等しくなっていることは、振動伝播の性状がスランプの違ったコンクリートでもその性質によ

って同程度の減衰傾向を示す場合があることの考えを示している。

このように、伝播中における振動の減衰は、コンクリートの種類によっても変わるが、その違いによる程度の差は、スランプ値が変化した場合より小さいことがわかる。

また、実験結果は、高性能減水剤に A E 補助剤を用いて、比較的空気量の多いコンクリートとすることにより、通常のコンクリートと同程度の強度とワーカビリティを有し、かつ振動締固めが容易なコンクリートを得ることが可能であることを示唆しているものとする。

5.7 本章のまとめ

振動機の特長としての加速度振幅とコンクリート中における加速度振幅との関係は振動締固め作用の強さを表す重要な要因であることを説明したが、本章では、第 4 章で提案した伝達率と減衰係数について、フレッシュコンクリートの諸性質と振動機の特長との関係がどのように明らかになった。non-A E コンクリートに関しては、①スランプの大きいコンクリートより硬練りコンクリートの方が伝達率が大きい、それと同時に減衰係数も大きくなる、②振動機の直径は伝達率に影響し、筒径が太く、振動数が 12000rpm 前後の振動機の方が伝達率は大きくなるが、減衰係数は無関係であった。③減衰係数は、コンクリートの性質によって異なるが、振動機の筒径の太さには影響されない。減衰係数は、伝播過程中的現象を表すものであって、本来、振動機の筒径の大きさとは無関係であることから、この実験結果は、ここで用いた解析方法の妥当性の一端を示しているものとする。④振動開始直後に比較すると伝達率および減衰係数とも振動時間の経過に伴う変化が少ないことが明らかになった。⑤ A E コンクリートの場合には、non-A E コンクリートと比較して、伝達率も大きくなるが、減衰係数の低下の割合も小さいことが確認された。さらに、高性能 A E 減水剤に空気量調整剤を添加して、空気量 4% の範囲では、伝達率もよく減衰係数も小さくなって、コンクリートの表面形状および強度から判定した有効範囲の拡大が確認された。

第 6 章

締固め条件と内部振動機の有効範囲 との関係

第6章 締固め条件と内部振動機の有効範囲との関係

—— 施工条件の最適化へのアプローチ ——

6.1 有効範囲の考え方と実験概要

6.1.1 締固め有効範囲の既往の研究とその考え方

振動締固めによるコンクリート表面性状の変化状況によって、有効範囲を判定しようとする研究については、S. G. Bergstrom¹⁾, J. Koleh²⁾, 山田ら⁵⁾, ACI 309委員会¹³⁾, L. Forssblad²⁸⁾, J. M. Plowman³⁰⁾, ACI SP-96¹³⁷⁾, 岩崎, 坂本^{7) 155) 156)}によって研究論文や総説が公表されている。それらの概要は以下のとおりである。

a. コンクリート表面の気泡、ブリージング域および沈下による有効範囲の判定

S. G. Bergstrom は、締固めたコンクリートの有効範囲の判断方法として、R. Dutron によって用いられた3つの作用半径によって締固めの有効判断を説明している。

- 1) 静圧が液状圧と等しい範囲の半径
- 2) コンクリート表面の沈下(沈殿)の半径
- 3) コンクリート表面の光沢面の半径

また、Bergstrom は、コンクリート表面に糸状の輪郭を作り振動によるコンクリート表面の沈下、光沢の範囲を測定し、振動時間の経過に伴う作用半径の拡大状況を調べている。

J. M. Plowman は、振動締固めたコンクリートが締固まった状態であることの判断方法として、軟練りコンクリートでは、コンクリート表面の気泡が出てこなくなったときを目視で判断している。また、比較的硬練りのコンクリートでは、電力計で入力を読み取りその値が最小となったときの状況を締固め終了として有効範囲の判断をしている。

J. Koleh は、振動締固めの分野における既往の研究者達は、“作用半径”という概念を導入していることを述べている。これは、挿入した振動機の周囲が通常の締固めに関して、水光りしている円形領域の範囲、ある

いは、振動開始後一定時間経過した時点での表面の高さなどの考えによって有効範囲を判断している。

また、J. Kolek は、締固めの有効範囲を測るのに、コンクリートがどのような物理的性質が最良であるか、その性質の測定にどのような方法を用いるべきかを決定しなければならない。その方法は最小の手立てで容易再現可能な簡単なものでなければならない。有効範囲の測定試験において最高の考慮を払うべき点は実用性のある結果でなければならないと指摘している。

締固めによる有効性の判断方法として、L. Forssblad²⁸⁾ は、“作用半径”の考え方を考慮に入れて、振動数および振幅と作用半径との関連性、振動棒の直径による作用半径の変化、振動棒の挿入深さと作用半径との関連性、骨材の最大寸法と作用半径およびコンクリートのコンシステンシーと作用半径との関連性についての研究結果を報告している。

振動締固めによる有効範囲を決定する方法として、Nippon-Wacker³⁸⁾ の、Steel-Rod法がある。これは、正確に一定な径と重さを持つ Steel-Rod を作動している振動機の近くに置き自重で沈下するようにする。Steel-Rod の沈下具合からコンクリート表面および深部における有効域を決定する方法があると紹介している。

また、有効範囲と締固めの程度は、上昇して来る気泡と一様な平面ができる事により判断が可能であることや、コンクリート表面でのブリージング水の広がりよりコンクリート中の方が有効域が大きくなって、その有効域は、振動機的能力とともに増加し、同時にコンクリートの配合にもよるものと述べている。

かた練り人工軽量骨材コンクリートの振動締固めの実験から、坂本、岩崎⁴⁾ は、振動締固め中のコンクリート表面の性状変化を観察すると、振動棒の周辺がいったん沈下した後、すぐ浮上がってくる。さらに、振動を続けるとコンクリート表面は再び沈下して表面にブリージング水がしみ出してくるという振動によるコンクリート表面の性状の変化、さらに、コンクリートの硬化後この床版の底面を調べるとコンクリート表面

のブリージング域よりも広い範囲の円形状にセメントペーストの平滑な面ができているなど、振動によって生じたコンクリート表面のブリージング域は、硬化後のコンクリートコア強度試験結果においてブリージング域が発生していない部分に比べて強度が増大していることを確かめている。このことは、コンクリート表面のブリージング域を締固めの有効範囲として判断するときの有力な目安となるとしている。

従来から行われている締固め効果の評価は、コンクリート中の微細な気泡の分布状態を観察したり、コンクリートの圧縮強度または引張強度の関数を評価基準としている。しかし、建築工事におけるコンクリートの締固めの第一義的な目的は、構造体として耐力に有害な組織的欠陥を防止する点にあるとして、山田ら⁵⁾ は、コンクリートの空隙率により締固め効果の評価している。

ACI309委員会¹³⁾ は、Forssblad が実験したコンクリートの締固めによるコンクリートの表面性状の変化過程を写真に撮影して、ブリージング域をそのコンクリートの有効範囲と判断している。

コンクリートの性質と振動数を変化させて締固めたコンクリート表面のブリージング域と加速度振幅、圧縮強度および透水係数についての実験から、締固めたコンクリート表面のブリージング域はかなり有力な締固め判断の資料となることを報告している。

通常コンクリートおよび高性能減水剤を用いたコンクリートの作用半径を決定するために ACI SP-96¹³⁷⁾ 振動締固め中のコンクリート表面のブリージング域を毎秒ごとに写真撮影して、その結果から内部振動機を使用したときの作用半径(ブリージング域の広がり)を決定するための標準試験を実施している。

振動締固めの進行状況を判断するに当って、コンクリート表面のブリージング域を視的に観測する方法は簡便でかつ有力であるとして、岩崎坂本¹⁵⁶⁾ は、内部振動機の振動数および振動部の振動筒径を変えた実験と、内部振動機からコンクリートへの振動の伝達または伝播中における減衰の解析を行い、コンクリート中の振動加速度分布はコンクリート表面のブリージング域に直接関係があって、締固めによるコンクリート表

面のブリージング域は締固めの有効範囲を評価するための重要な要因であることを指摘している。

b. 加速度、振動圧、液状化およびエネルギーによる有効範囲の判断

振動機からコンクリート中への伝達による有効範囲の評価は、S. G. Bergstrom¹⁾, J. P. Collin³⁾, 尾坂²⁶⁾, 神山, 遠藤³⁶⁾, Nippon-Wacker³⁸⁾ 川崎, 越川, 佐藤¹²⁴⁾, 岩崎¹⁵⁷⁾, 村田¹⁶⁰⁾ によって報告されている。

S. G. Bergstrom¹⁾ は、コンクリートの振動締固めに関する基礎実験の中で振動機からの距離と振幅の減衰関係は、振動機からの距離による振幅の変化に近似していたが、締固め程度の評価にこれを直接用いることは出来ないと述べている。

また、作業半径を表わす曲線は、コンクリート中の加速度の値と振動機の加速度の値によってほぼ分類される。他方、作業半径と振動数、振幅、または遠心力との間にはこれらを個別に変えた場合には関連性が見られない。従って、加速度または、速度が振動機の決定要因であるとしている。

尾坂²⁶⁾ は、まだ固まらないコンクリートの振動効果を判定する方法として、振動をうけているコンクリートの内部圧力のその静圧力に対する増加、コンクリート分子の振動加速度、振幅など観察すればある程度判断することができるが、これらの現象は実際の現場の作業において、一般的に直接測定することができないので、コンクリート表面の沈降の状況を観察するのが有効な方法であると説明している。

神山, 遠藤³⁶⁾ は、人工軽量骨材を用いたコンクリート中にマイクロフォンを埋設して、振動圧とその減衰状態を測定し、これらから振動中心からの距離と振動圧または振動加速度との関係を求め振動締固めの有効範囲を決めることを目的とした実験を行っている論文の中で、振動圧の伝播について、S. G. Bergstrom, P. Kremer, H. F. Schulz, 内藤, 安藤, 北川の研究を紹介し、これらの振動圧の測定は最終的には、“締固めの有効範囲”の決定を目的としているが、“締固まった”と判断する基準は明らかでな

いと報告している。

さらに、神山, 遠藤³⁶⁾は、S. G. Bergstrom の論文から、コンクリート中に埋設した圧力計の読み、コンクリート表面の沈下範囲および表面の光沢の3つから有効範囲を求めていることや、J. Kolek が硬化コンクリートの超音波速度、立方体強度、単位容積質量およびシュミットハンマの反発係数によって調べているが、超音波速度が最も有効であることを説明している。また、安藤, 北川も同様の方法を試みて、動弾性係数、圧縮強度および単位容積質量の比較をおこなっているが有効範囲を明らかにするほどの顕著な差異は認められないとしている。

これらの方法は、振動圧の減衰が連続的であることに注目すれば当然の事であり、振動中心からある距離だけ離れた位置のコンクリートの性質が急に変化するとは考えられないので有効な方法とは言えないと報告している。

内部振動機の振動棒からの作用半径について、J. P. Collin³⁾は、コンクリートの液状化を考慮して、次のような単純な試験方法を用いている。

打設高さが作用半径を測定したい振動棒の長さにほぼ等しくなるように、コンクリートを型枠の中へ流し込む。そして、コンクリートの表面に垂直に同じ長さの一組の鉄棒を立てて置き振動棒を型枠の中央に挿入する。振動棒に最も近い鉄棒は沈下し、この沈降過程は振動機の振動機に近い順からそれぞれの鉄の棒は型枠の底に接触することが観測された。また、距離があると、鉄棒は部分的にしか沈下せず最も遠いものは、コンクリート中に鉄棒は沈入しない。このような結果から、作用半径は内部振動機と型枠の底部に到達しない間の距離を振動機締固めの有効作用半径の距離であるとしている。

A. Lassalle, C. Legrand^{16 1)} は、締固めによる有効振動域の諸限界は、じょう乱限界および流動限界と呼ばれて来ていた。これらの限界の位置は、粒子間結合力の関係を担う主要因たる振幅にも、また、同時に振動の限界減衰を実質的支配する振動数にも依存するものである。例えば、

振動数が増大すれば振動の減衰が弱まり、それによって、より遠くまで振動が伝達される傾向を持つ、これとは反対に応答振幅が減少すると振動の有効性がせん断領域での影響力を減じてしまうことになる」と報告している。

村田¹⁶⁰⁾ は、総振動エネルギーは締固め度の有力な指標となるものであって、種々の配合のコンクリートについてあらかじめ、総振動エネルギーと圧縮強度(振動締固め度)の関係が得られていれば施工の合理化に有効に用いることができるとしている。

振動機の振動特性とコンクリートの性質を基準にして、川崎, 越川, 佐藤¹²⁴⁾ は、無負荷の振動機の加速度、材料減衰係数、負荷減衰係数および締固め係数の関係式を導いて、振動時間 t 秒間においての最大締固め度の 90% (最大圧縮強度の 90%) が得られる内部振動機からの距離を締固め有効範囲 X として評価している。

岩崎¹⁵⁷⁾ は、内部振動機の液状化作用と作用領域の関係を理論的に考察して、内部振動機によるコンクリートの締固めを振動の液状化作用を受けたコンクリートが液状化し、自重によって流動および沈下する現象としてとらえることにより、締固め問題の定量的な取り扱いが可能となったとして、具体的な解析結果から、液状化作用値 L_q 、液状化抵抗値 L_r および基本振動時間 T_0 を振動締固めに関する基本的な特性値として導出し、振動機とコンクリートの接触面におけるコンクリートの加速度振幅、減衰係数などの実験結果を集積すれば振動締固め作業を最適化するための有効半径を求めることが可能となったと論じている。

6.1.2 実験概要

振動機による締固め効果を判断する方法は、前述のように数多くの提案があるが、基本的にはコンクリート構造物の硬化後におけるコンクリートの性質と均質性を考慮しなければならない。しかし、これをコンクリート施工中に判定することは困難な場合が多いので、一般には打設したコンクリートの表面の状況を観察して施工中のコンクリート表面のブリージング域(水の光)の生じた範囲を締固まった部分とする方法がとられている。しかし、振動締固め時においてはブリージング域ばかりでなく、気泡の浮上も起こってくるので、これらの双方を考慮に入れてコンクリート表面の性状変化過程を目視的(ブリージング域、気泡等)に観察した結果と硬化コンクリートの強度との関連性について実験を行い、締固めの判定方法としての目視法の有効性を確かめた。

実験に使用したコンクリートは、表 6.1に示す配合のレディーミクストコンクリートである。

表 6.1 実験に使用したコンクリートの性質

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スラブ の目標 (cm)	空気量 の目標 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
20	2.5	2.0	55.0	46.0	163	207	876	1038
	8.0				182	331	840	996
	12.0				192	349	822	975
	18.0				206	375	796	941

表 6.2 無負荷時における内部振動機の加速度振幅 a_v

振動数 (vpm)	振動機 の筒径 ϕ (mm)	加速度振幅 a_v (g)				
		1回	2回	3回	4回	平均値
12000	30	99.58	96.78	95.08	95.68	96.78
	40	81.59	80.65	81.30	81.30	81.30
	50	106.20	104.59	104.16	104.41	105.09
	60	114.25	113.82	114.93	114.33	114.33

内部振動機の無負荷時における特性は、表 6.2 に示したとおりであって、振動機に使用した加速度計は、容量 500(g)のものである。これを振動機の回転重錘の長さ方向の中心位置にあたる振動筒表面部に取り付け固定して無負荷時およびコンクリート中での加速度振幅を測定した。また、コンクリート中に埋設した加速度計は容量 20 (g)である。

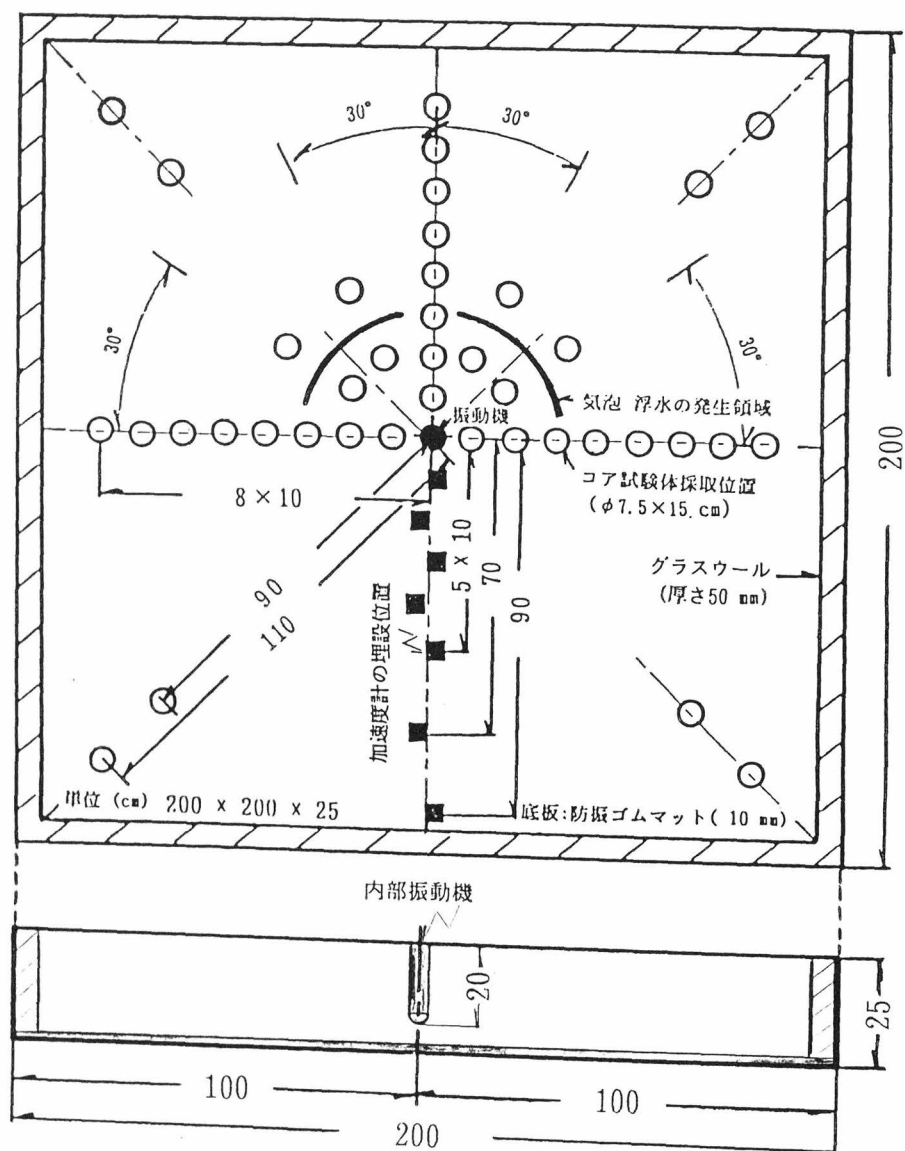


図-6.1 実験に使用した型枠と加速度計の配置位置
および供試体の採取位置

振動締固め中のコンクリートの表面状況の振動による変化の過程は、振動機の作動開始から振動時間 5 秒間隔で 30秒までの 6 回と振動時間 60秒の 6 回について連続的に写真機とビデオカメラで撮影し、これを用いて気泡およびブリージング域を最大方向とその直角方向で計測してその平均値を実験値とした。また、振動時間 60 秒の場合には、実験終了と同時にコンクリート表面からその範囲を計測した値である。実験に使用した型枠と加速度計の埋設位置およびコア供試体の採取位置（ $\phi 75 \times 200\text{mm}$ ）について図-6.1 に示した。

締固めたコンクリートの品質の判定に用いたコンクリート試験体は、コンクリートの打設締固め終了から 2 日後に直径 $\phi 75\text{mm}$ と長さ 200mm のコア供試体をコンクリート試験体の所定の位置(図-6.1) から採取して、約 150 mm の長さに切断して $1\sim 2\text{ mm}$ の厚さに供試体の両面キャッピングを施した。その後、直径 3箇所（最大に対して直角の 6 箇所の平均値）と高さは十字に測定した 2 回の平均値を用いた。試験体の養生方法は室温 20°C ，湿度 70 %の室内養生を行って材令 28日で圧縮強度を試験し、締固めたコンクリート床版の各位置での平均値を実験値とした。

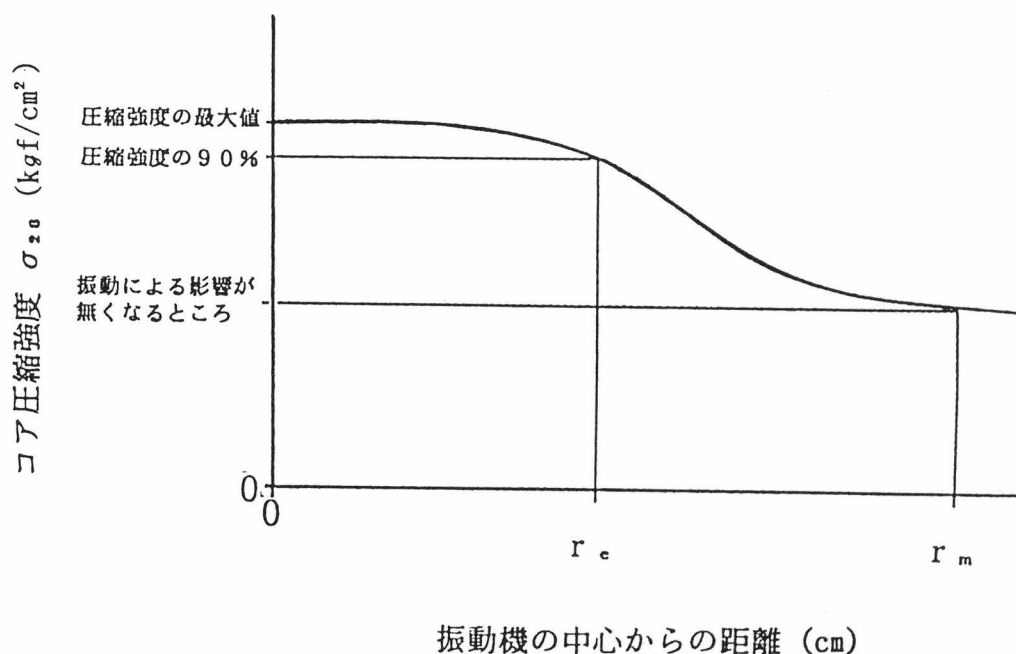


図-6.2 締固めによる有効範囲のモデル

6.1.3 本研究における有効範囲の考え方と表示方法

本実験での締固め有効範囲の考え方は、図-6.2のように振動機中心からの距離によるコア強度の変化を図示化して、締固めたコンクリート床版から採取した供試体の圧縮強度の最大値の90%の強度となる点での振動機の中心からの距離を r_e としてこれを締固めの有効範囲として、気泡、ブリージング域を比較することによって、振動締固め中のコンクリート表面の性状変化を目視観察によって有効範囲として判断することが適切であるかどうかについて考察した。

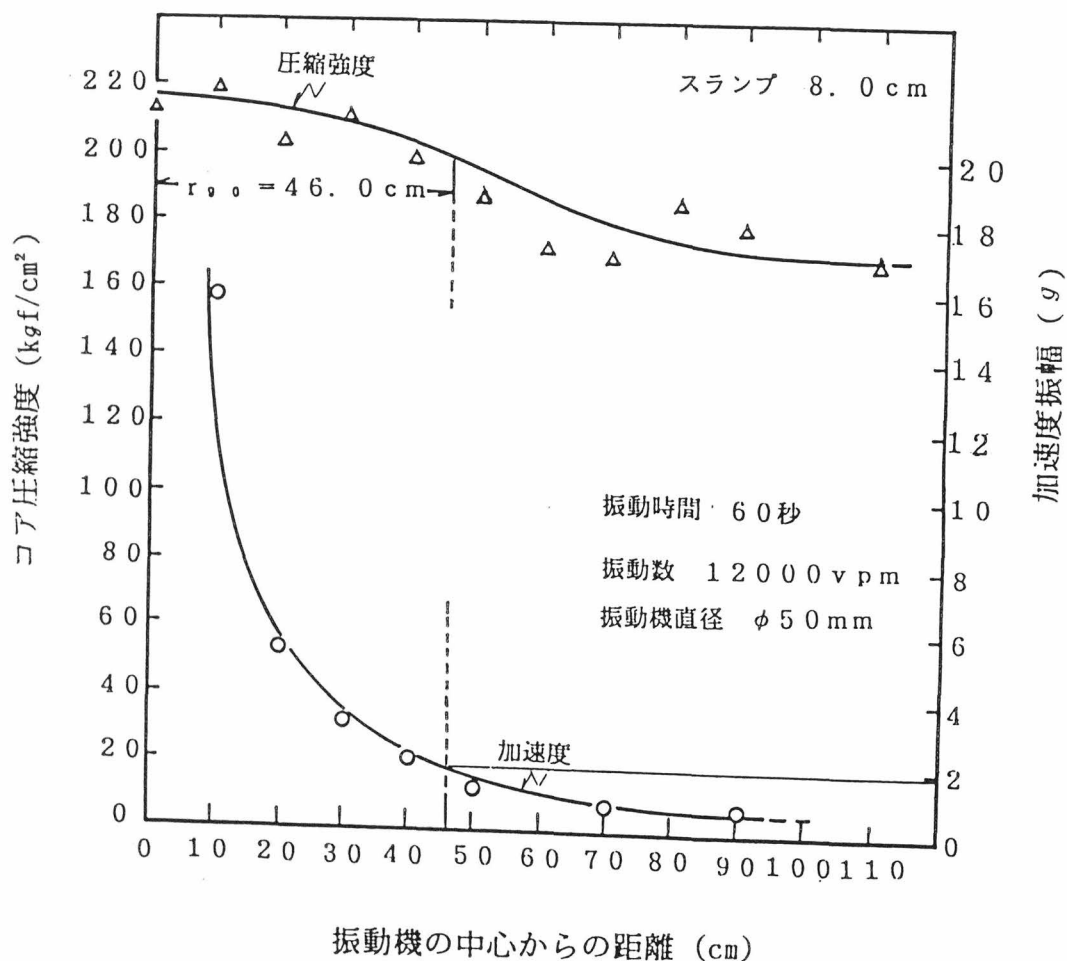


図-6.3 振動機の中心からの距離と圧縮強度および加速度振幅の関係

また、図-6.3 に図示したように、コア供試体強度の最大値 σ_{max} に対する比 σ_r / σ_{max} (σ_r = 振動中心から r cm におけるコア圧縮強度) を締固め度 C (したがって、 $r = r_e$ では $C \approx 90\%$)、気泡発生領域の半径を r_A 、 $r = r_A$ におけるコンクリート中の振動加速度 a_A 、ブリージング域の半径を r_W 、 $r = r_W$ におけるコンクリート中の振動加速度を a_W とした。

6.2 締固め時におけるコンクリート表面の状況変化と硬化コンクリートの性質との関係¹⁶²⁾

6.2.1 コンクリート表面の気泡発生範囲と加速度振幅との関係

振動締固め時におけるコンクリート表面の性状変化を目視的に観察すると振動特性の影響とコンクリートの性質から、コンクリート表面に浮上してくる気泡とブリージング域、そして沈下などの性状変化がみられる。ここでは、コンクリートの性質と振動特性を様々に変えた実験の結果から気泡の発生範囲と加速度振幅との関係について検討した。

表 6.3 気泡の発生領域の半径 r_A (cm) およびその位置におけるコンクリート中での加速度振幅 a_A (g)

振動数 (vpm)	振動機 の筒径 ϕ (mm)	スランプ (cm)							
		2.5		8.0		12.0		18.0	
		r_A	a_A	r_A	a_A	r_A	a_A	r_A	a_A
12000	30	10.5	5.28	8.0	2.94	7.0	2.78	7.0	2.96
	40	10.0	4.91	15.0	2.44	11.0	3.64	11.0	2.28
	50	18.0	5.16	20.0	5.63	16.0	6.62	15.0	4.23
	60	28.0	3.08	22.5	5.79	17.5	4.85	21.0	3.60

表 6.3 は、コンクリートのスランプと振動機の振動筒径が変化した場合の気泡の発生領域 r_A (cm) とその位置におけるコンクリート中の加速度振幅 a_A (g) を示したものである。なお、加速度振幅の値は、実験結果に基づいた、振動機中心からの距離—加速度振幅曲線から求めた。(図-6.3 はその一例)

振動数 12000vpmと一定にした条件で振動機の筒径を $\phi 30\text{mm}$, $\phi 40\text{mm}$, $\phi 50\text{mm}$ と $\phi 60\text{mm}$ の4種類に変えて、スランプ 2.5cm の硬練りコンクリートの表面に発生した気泡の広がりを示したのが図-6.4 である。振動機の筒径が細い $\phi 30\text{mm}$ と $\phi 40\text{mm}$ の気泡の生じた範囲は、振動時間が 30秒経過した後にはほぼ同じ傾向を示していて振動時間が60秒になってもその差は同じである。しかし、振動筒径が $\phi 50\text{mm}$ から $\phi 60\text{mm}$ に太くなると振動時間の開始直後 5秒から振動時間が30秒になるに従って気泡の発生領域は拡大されて、振動機の振動筒径による差異が生じている。

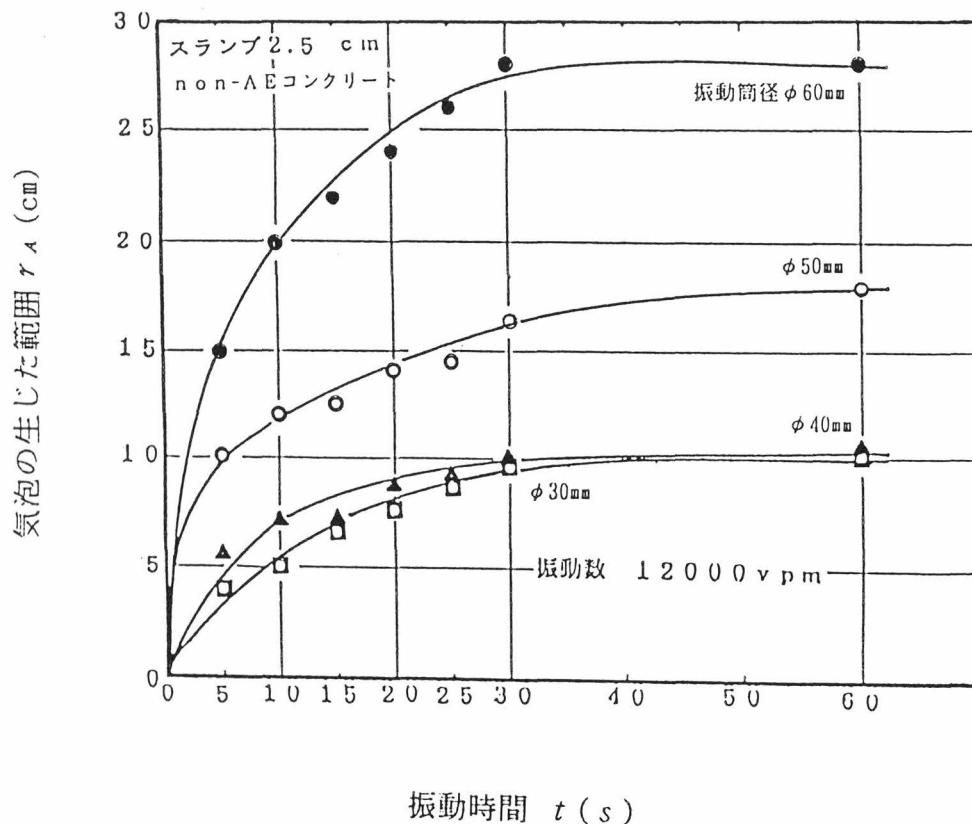


図-6.4 気泡の範囲と振動時間との関係

このような振動機の特性和コンクリートの性質を有するときの気泡の生じた範囲は、最大 28.0cm になっている。表 6.3 を通覧すると、気泡の発生領域は振動機の筒径に関連があって、筒径の小さい振動機の場合には気泡発生領域 r_A が小さく、筒径が大きくなると気泡発生領域も大きくなっている。

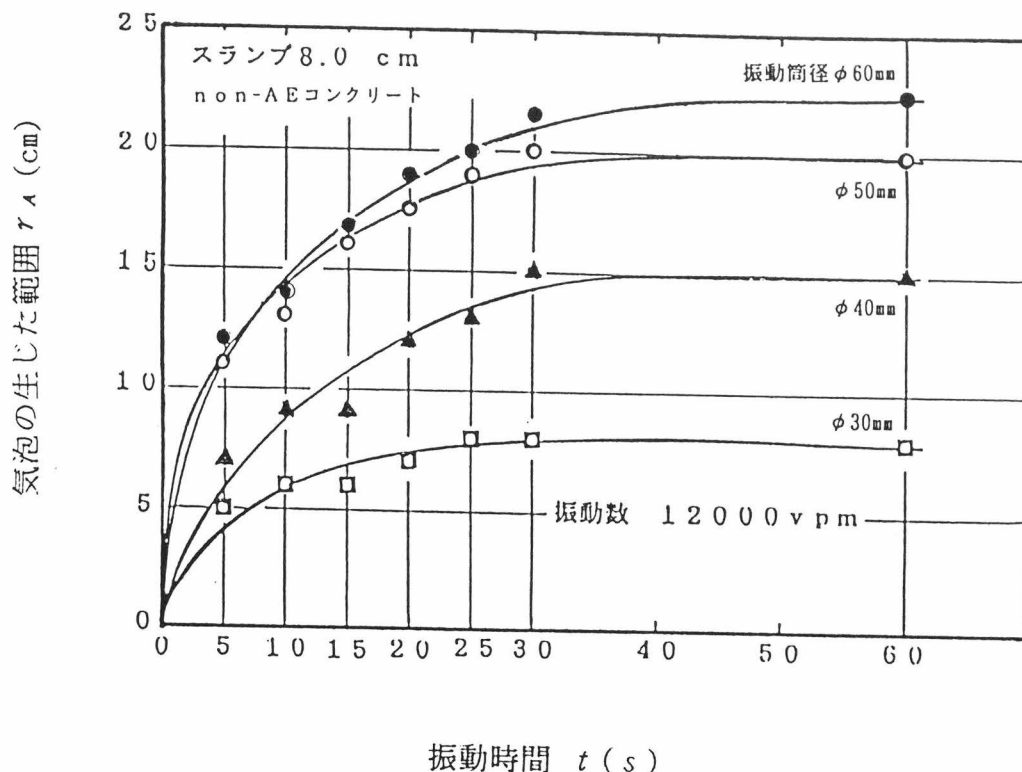


図-6.5 気泡の範囲と振動時間との関係

図-6.5 は、スランプが 8.0cm のコンクリート表面の気泡の発生状況を示したものであって、コンクリートの性質が変わると振動機の振動筒径の影響が $\phi 30\text{mm}$ と $\phi 40\text{mm}$ に生じているが、振動筒径 $\phi 50\text{mm}$ と $\phi 60\text{mm}$ における気泡の発生範囲 r_A は、振動筒径 $\phi 50\text{mm}$ の気泡で 20cm、 $\phi 60\text{mm}$ では 22.5cm となってその差は小さくなっている。このような状況における加速度振幅 a_A の値は $\phi 50\text{mm}$ で 5.63(g)、 $\phi 60\text{mm}$ で 5.79(g) となっていて r_A と同様に加速度の差も小さくなっていることがわかる。

図-6.6 は、スランプ 12.0cm のコンクリート表面の気泡の発生状況を示したものであって、気泡の発生傾向は、前述のスランプ 2.5cm の結果とよく類似している。しかし、表 6.3 に示すように、スランプ 2.5 cm のコンクリートに比べて、振動筒径が細い $\phi 30\text{mm}$ 、 $\phi 40\text{mm}$ は、加速度振幅は小さく、太い筒径の $\phi 50\text{mm}$ と $\phi 60\text{mm}$ での加速度振幅は大きくなっている。このことは、振動数が 12000vpm と一定とした条件下では、振

動筒径とコンクリートの性質に関連性があることは既に説明しているが振動筒径が $\phi 50\text{mm}$ と $\phi 60\text{mm}$ のときは、硬練りコンクリートおよび軟練りコンクリートの双方のコンクリートの性質に共通して振動伝達の有効性を有しているものとする。

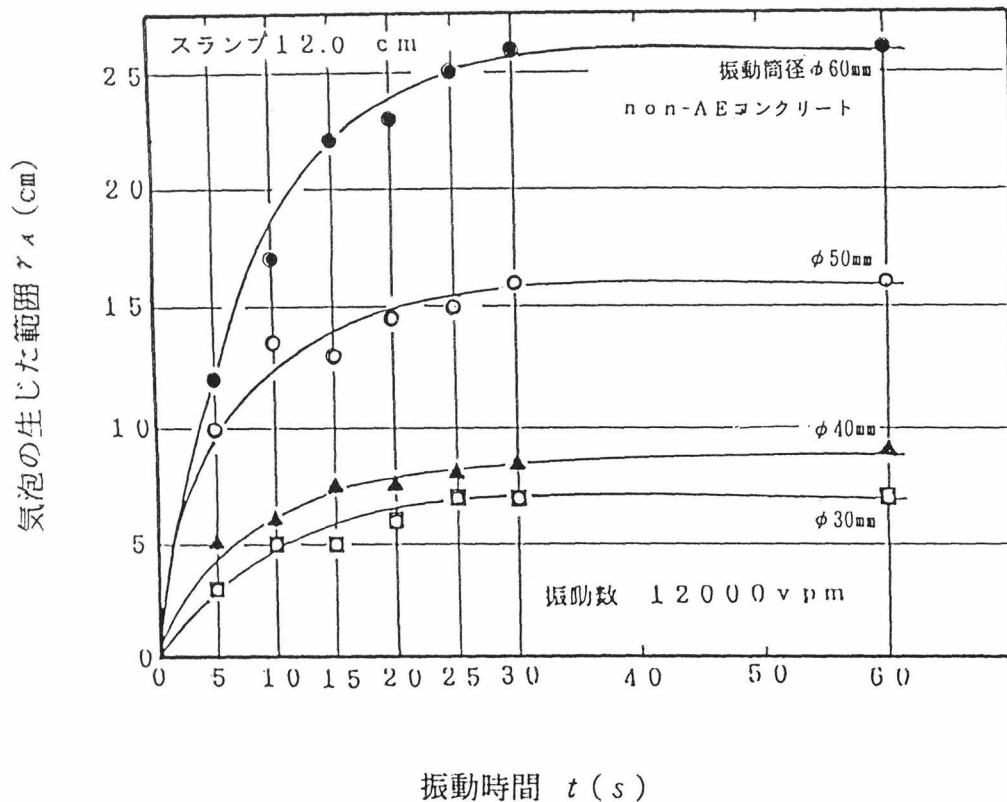


図-6.6 気泡の範囲と振動時間との関係

コンクリートの性質によっては、コンクリート表面のブリージング域を目視観察することが困難な場合があって、図-6.7 に示したスランプ 18.0cmのコンクリートもその一例である。このような場合にはコンクリート表面に生じた気泡によって締固めの判断をすることが考えられるがコンクリート表面の気泡の発生領域は、スランプ 2.5cm のコンクリートに比べて小さくなっている。

ここで、再び表 6.3 を通覧すると、コンクリート表面に気泡の発生した領域 $r = r_A$ における加速度振幅 a_A は、スランプ 2.5cm の場合、振動筒径の大小にかかわらずほぼ一定（平均値 4.61 g、標準誤差 0.51 g）となっているのに対して、スランプが大きいコンクリートでは a_A は筒径が小さい場合に小さくなっている。すなわち、スランプの大きいコンクリートの場合には、筒径の小さい振動機の方が筒径の大きい振動機よりも加速度振幅の小さい位置で気泡が発生していることがわかる。この理由は、気泡が発生した時点では加速度はもっと大きくて他の場合とはほぼ同等であったものが、筒径の小さい振動機では r_A が小さく、したがって、気泡発生領域は距離による加速度の変化の大きい点であること、締固まりの容易な軟練りコンクリートでは締固めの時に空気とともに水も上昇してコンクリートの性質が変化し、振動加速度に影響したことが原因として考えられる。

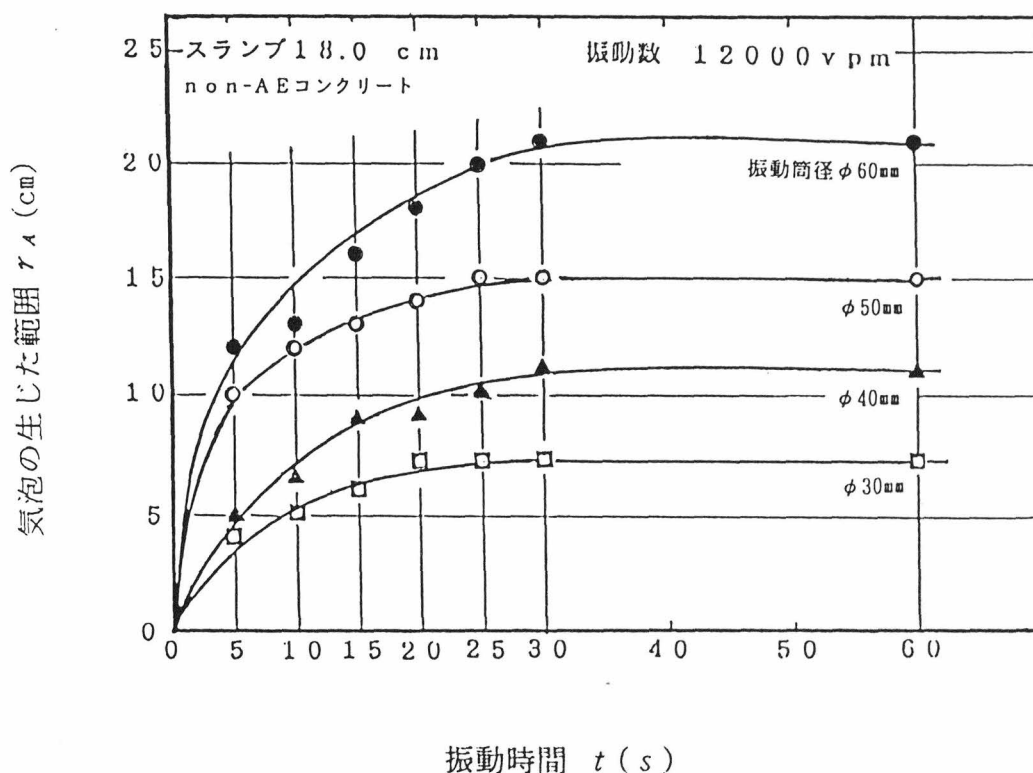


図-6.7 気泡の範囲と振動時間との関係

このように、振動締固めに必要な加速度振幅の最小値は、振動機の特
性、コンクリートの性質、ブリージング域そして硬化後のコンクリート
の強度との関係から判断するのが適切であると考ええる。このような締固
めの状況を考慮して締固めに必要な最小加速度振幅を硬化コンクリート
の強度から考察した有効範囲 r_{90} との関係を表 6.4 に示した。この結
果を詳細にみると、コンクリートの性質、振動特性および振動時間の影
響があって、種々の組合せによる最小加速度振幅の値を評価することが
可能であると考えられるが、このような場合でも、締固め有効領域が最
も広い場合のコンクリートの性質と振動特性との関係を考えれば締固め
の効率の点で適切である。よって、スランプ 2.5cm のコンクリートの性
質では振動筒径 $\phi 50\text{mm}$ と $\phi 60\text{mm}$ で加速度振幅 a_{90} は $1.32(g) \sim 1.41$
 (g) の範囲にあり、スランプが 8.0cm のコンクリートの性質では、 1.41
 $(g) \sim 1.72(g)$ の加速度振幅が得られている。

表 6.4 有効範囲 r_{90} (cm) の位置における加速度振幅の値 a_{90} (g)

振動数 (vpm)	振動機 の直径 ϕ (mm)	振動 時間 (秒)	スランプ (cm)							
			2.5		8.0		12.0		18.0	
			r_{90}	a_{90}	r_{90}	a_{90}	r_{90}	a_{90}	r_{90}	a_{90}
12000	30	60	23.5	2.25	34.5	0.87	42.0	0.67	.....	.....
	40	60	23.0	2.16	33.0	1.14	45.0	1.12	.....	.....
	50	10	32.0	2.92	39.0	2.79	37.0	2.37	.....	.....
		20	35.0	2.42	41.0	2.56	40.0	2.21	.....	.....
		30	41.0	2.06	44.0	2.20	42.0	2.26	.....	.....
		60	45.0	1.41	46.0	1.72	50.0	1.78	.....	.....
	60	60	42.0	1.32	48.0	2.03	52.0	1.35	.....	.....

さらに、コンクリートの性質が軟らかいスランプ 12.0cm では、 1.35
 $(g) \sim 1.78(g)$ の加速度振幅がこの実験の範囲内で締固めに必要な加速
度振幅の最小値であった。

6.2.2 締固め時における気泡およびブリージング域発生状況がコア強度におよぼす影響

締固めによるコンクリート表面の性状変化とコンクリートの強度との間の関連性を理解することによって、コンクリートの振動締固めによる品質の判断が締固めが進行している間に判断出来れば非常に合理的な締固めが可能であり、締固めにおける労力と作業時間の損失を無にすることが考えられることから、締固めたコンクリートの床版から採取したコア供試体によって、気泡およびブリージング域 r_A 、 r_W と強度の関係について検討した。

また、締固め後の硬化コンクリート床版からのコア採取位置の例と硬化コンクリート床版から採取したコア供試体の例について写真 6.1 と写真 6.2 に示した。

図-6.8 は、スランプ 2.5cm のコンクリートを振動数 12000回/分として振動筒径 $\phi 30\text{mm}$ 、 $\phi 40\text{mm}$ 、 $\phi 50\text{mm}$ と $\phi 60\text{mm}$ によって振動時間 60秒で締固めた結果の強度と振動機の中心からの距離との関係を示した。

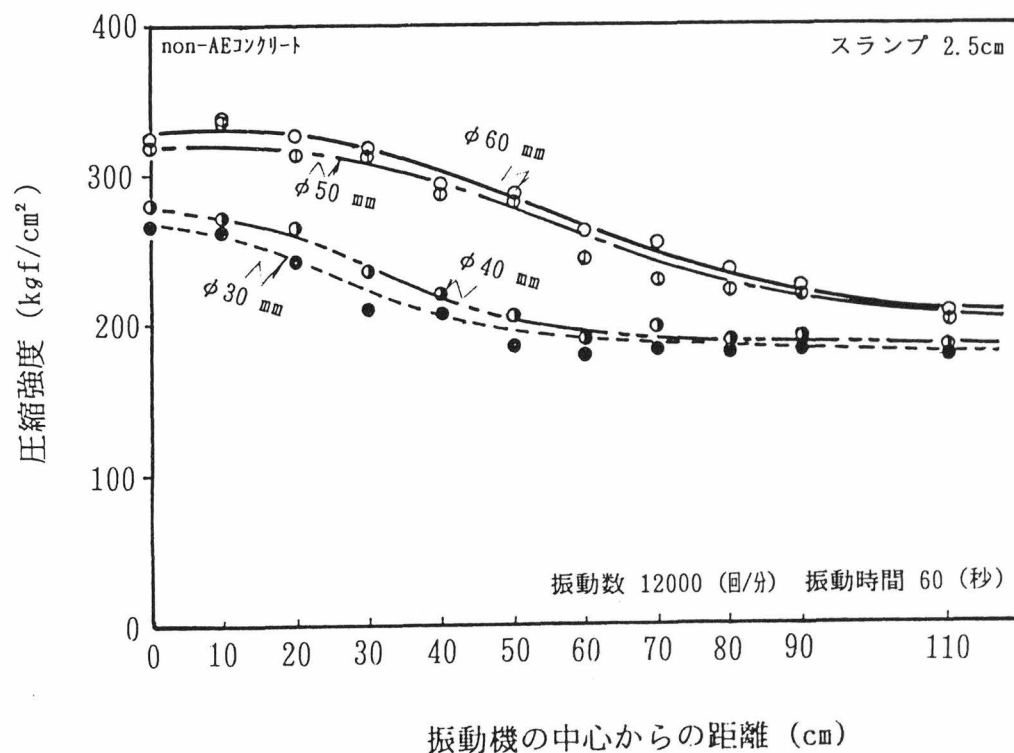


図-6.8 圧縮強度におよぼす締固めの影響

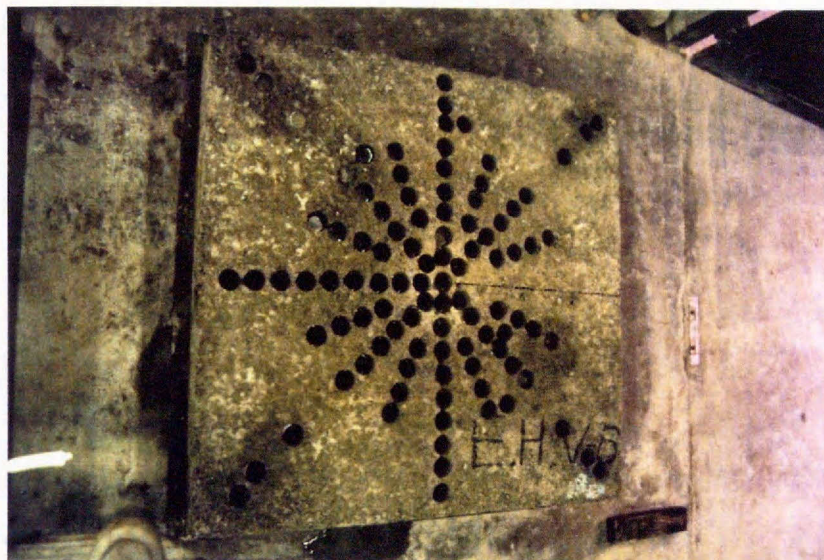


写真 6.1 硬化コンクリート床版から採取したコア位置の例



写真 6.2 硬化コンクリート床版から採取したコア供試体の例

コンクリート床版から採取した平均コア圧縮強度は、振動筒径の太さに影響があって、 $\phi 30\text{mm}$, $\phi 40\text{mm}$ ではほぼ等しい強度を示して振動機の中心からの距離が 50cm 付近から締固めによる差が無くなっている。これに対して、振動筒径が太くなって、 $\phi 50\text{mm}$, $\phi 60\text{mm}$ の場合には、強度性状が等しくなっていて締固めによる影響が無くなった位置の強度低下は、振動機の中心から $80\text{cm}\sim 90\text{cm}$ 付近になっている。このことは、気泡の発生範囲よりも拡大された位置まで振動の効果が及んでいることを示しているものと思う。

このような関係を詳細に検証するために、締固め強度を基準として考えた(表 6.4) $C=90\%$ の有効範囲とした結果の資料を表 6.5 に示した。図-6.8 に示したスランプ 2.5cm コンクリートの強度の有効範囲 r_{90} は振動筒径が変わっても気泡の生じた範囲よりも約2倍以上になっていてコンクリート表面の気泡の生じた範囲よりもさらに拡大されている結果を示した。また、振動筒径が変わっても有効範囲がおおよそ等しくなっていることは、気泡の生じた範囲と強度の関係がほぼ比例関係にあることを示しているものと判断される。

表 6.5 有効範囲 r_{90} (強度比90%)と気泡およびブリージング域 r_A , r_W

r_{90} と気泡およびブリージング域との比 ($r_{90}/r_A, r_W$)						
振動数 (vpm)	振動時間 t (秒)	振動機 の筒径 ϕ (mm)	気泡			ブリージング域
			スランプ(cm)			スランプ(cm)
			2.5	8.0	12.0	8.0
12000	60	30	2.24	4.31	6.00	1.73
	60	40	2.30	2.20	4.09	1.47
	10	50	2.67	2.78	2.74	1.73
	20		2.50	2.34	2.86	1.49
	30		2.48	2.30	2.63	1.53
	60		2.50	2.30	3.13	1.43
	60	60	2.10	2.13	2.97	1.48

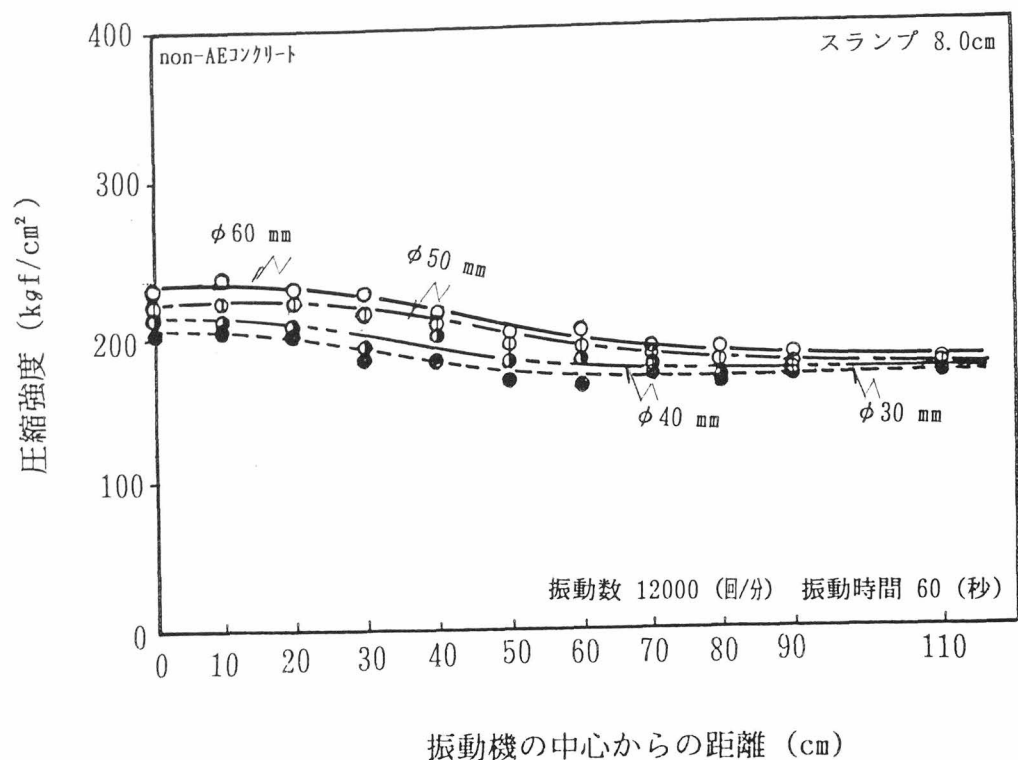


図-6.9 圧縮強度におよぼす締固めの影響

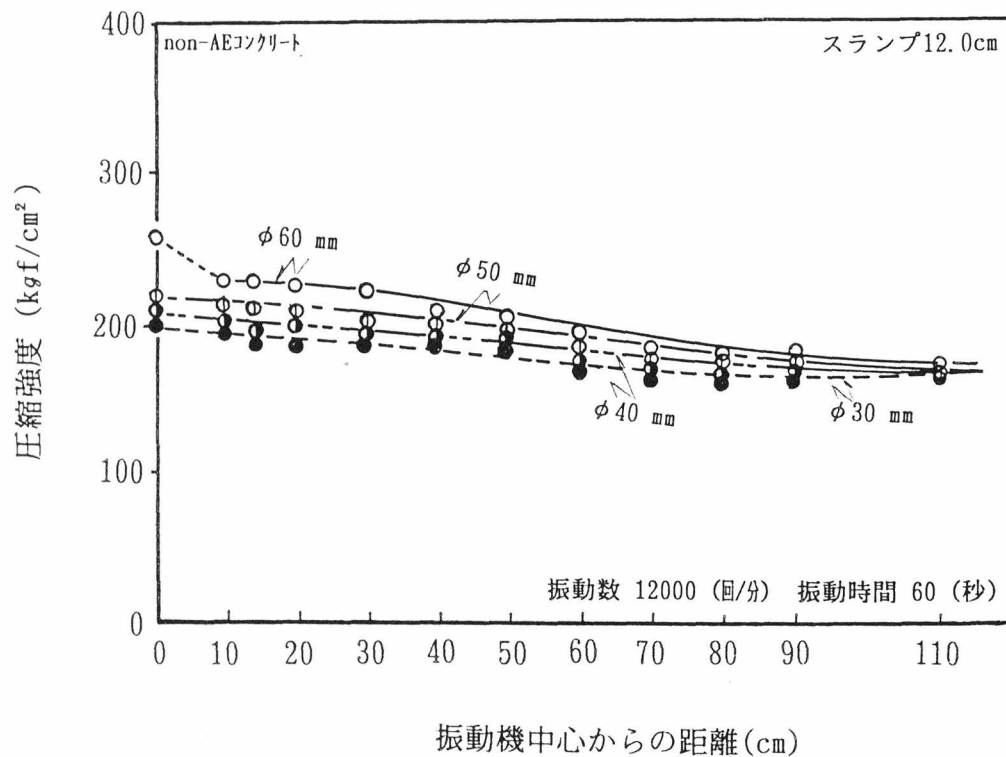


図-6.10 圧縮強度におよぼす締固めの影響

図-6.9 と図-6.10 に、スランプ 8.0cm のコンクリートおよびスランプ 12.0cm のコンクリートの圧縮強度と振動機を中心からの距離との関係を示した。

スランプ 8.0cm とスランプ 12.0cm のコンクリートの強度はほぼ等しい傾向を示しているが、コンクリート表面の気泡と有効範囲（締固め度 $C=90\%$ ）の関係は振動筒径の影響があって、有効範囲／気泡の生じた範囲の関係を示した表 6.5 から、スランプが 8.0cm のコンクリートよりも 12.0cm のコンクリートがやや大きい締固めの範囲を示している。これは、スランプ 8.0cm の有効範囲よりもスランプ 12.0cm の強度性状の有効範囲がやや広がっていることと気泡の広がり小さいためにスランプ 8.0cm よりもスランプ 12.0cm のコンクリートの有効範囲／気泡の広がり関係がやや大きくなったものと考ええる。

次に、スランプ 18.0cm のコンクリートを振動数 12000vpm で、振動筒径を $\phi 30\text{mm}$ 、 $\phi 40\text{mm}$ 、 $\phi 50\text{mm}$ および $\phi 60\text{mm}$ の 4 種類に変えて、60秒間締固めたときの関係を図-6.11 に示した。

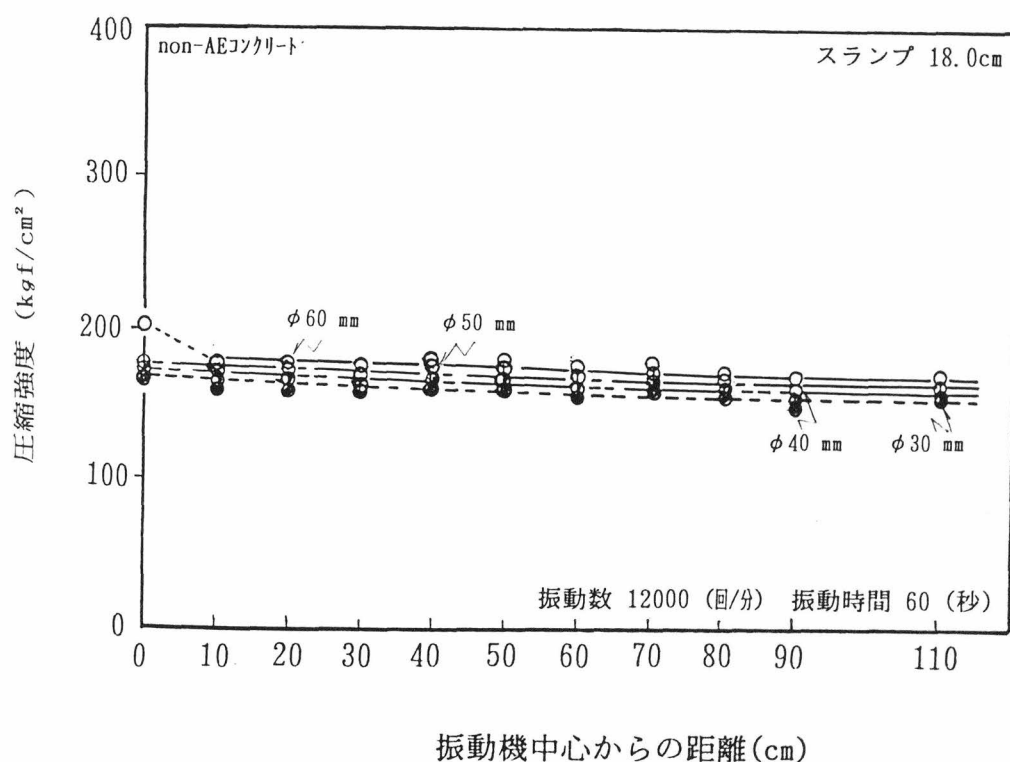


図-6.11 圧縮強度におよぼす締固めの影響

図-6.11 に示したように、振動筒径を変えても締固めたコンクリートの強度は振動機からの距離に関係なく、締固めを行ったスランプ18.0cmのコンクリート床版の強度は、締固まった位置と締固まらない位置での差がなく、一定の強度における有効範囲(締固め度 $C=90\%$)を見出すことは不可能であった。このことはスランプ 18.0cm 程度の軟練りコンクリートの場合には振動機は締固めによるコンクリートの品質改善よりも、むしろ、振動によってコンクリートを液状化し、型枠内に均一に充填することが主要目的となることを意味している。

図-6.12 は、スランプ 8.0cm のコンクリートについて、振動時間とブリージング域との関係を振動筒径を $\phi 30\text{mm}$, $\phi 40\text{mm}$, $\phi 50\text{mm}$ および $\phi 60\text{mm}$ の4種類に変えて実験した結果である。

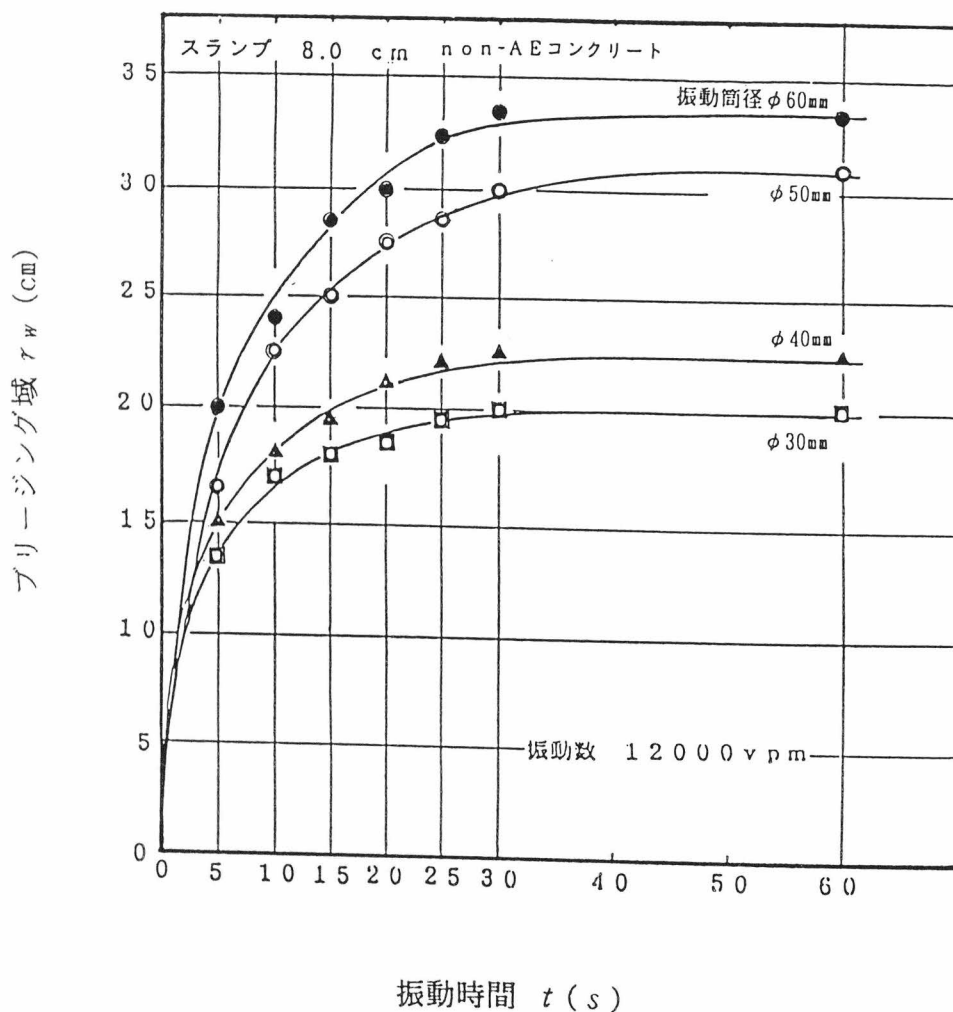


図-6.12 振動時間とブリージング域との関係

図-6.12 によれば、コンクリート表面に浮上したブリージング域は振動の初期に急速に拡大して振動時間約30秒でほぼ最大値に達し、その後は振動時間を長くしてもほとんど増加していない。

このようなブリージング域の拡大経過は、コンクリートの性質や振動機の特徴が変化した場合でも同様の傾向を示した。

表 6.6 は、スランプ 8.0cm のコンクリートについてブリージング域の半径 r_w とその位置におけるコンクリート中の加速度振幅を示したもので、最下欄には、 r_w の位置のコア圧縮強度 σ_w とコア試験結果の最小値 σ_{min} との比を締固め有効度として示したものである。

表 6.6 ブリージング域半径 r_w (cm)およびその位置におけるコンクリート中の加速度振幅 a_w (g)と締固め有効度 σ_w/σ_{min} (振動時間 60秒)

振動数 (vpm)	スランプ (cm)	振動機の筒径 ϕ (mm)							
		30		40		50		60	
		r_w	a_w	r_w	a_w	r_w	a_w	r_w	a_w
12000	8.0	20.0	1.34	22.5	1.54	31.0	3.05	33.5	3.16
締固め度		1.12		1.09		1.24		1.31	

ここで、これまで述べたコンクリート表面の性状変化として、振動による気泡およびブリージング域 r_w との関係は、表 6.3 および表 6.6 によれば、振動機の筒径(直径)に関係があって、振動機の筒径の大きいほど r_A , r_w とも大きいことがわかる。また、ブリージング域の発生を締固めの指標とした場合の締固めに必要な加速度振幅 a_A は、スランプ 8.0cmのコンクリートで 1.34~3.16(g)以上となっている。

一方、表 6.6 に示したブリージング域の外周位置における締固め有効度は 1.09~1.31倍であって、振動機の筒径 ϕ 30mm, ϕ 40mm, ϕ 50mm および ϕ 60mm の順に大きくなっているが、この順序は r_w の位置における加速度振幅の重要性を示すとともに、振動機の直径が大きい場合にはブリージング域外であっても十分締固まっている場合があることを示唆するものと考ええる。

6.2.3 圧縮強度および透水係数と締固めの判定方法との関係

(1) 上下層での強度差

厚さ 20cm 程度の版状の硬練りコンクリートを内部振動機によって締固めると、コンクリート床版の表面に生じたブリージング域と底面に生じたペースト域との間の部分は密実に締固まっていることが人工軽量骨材を用いて行った著者の既往の実験において認められている。⁴⁾ このようなことを考慮して、図-3.13 の型枠を用いてコンクリート床版を作製し、その上下層からコア供試体を採取して圧縮強度について検討した。コンクリートの性質は表 4.3 を使用した。

図-6.13は、振動機の振動数を変えて締固めたコンクリート床版の上層、下層部から採取したコア供試体($\phi 5 \times 10\text{cm}$)の圧縮強度を示した図である。この結果をみると振動数が高いほど強度は大きく、また、下層部の方が全般的に強度が大きい。しかし、強度差が生じると考えられた高速振動数 12000vpm の場合でも差は約 30kgf/cm^2 前後に止まっている。また、振動時間10秒では、強度からみて振動機の中心から近い 10cm の位置においても過剰振動状態に達していないことがわかる。コンクリートの性質に関しては、空気量 2.0%, スランプ 5.0cm のコンクリートよりも空気量 4.0%, スランプ 12.0cm のコンクリートの強度がやや大きい傾向を示した。

(2) 透水係数の分布

締固め時に生じるブリージング域、粗骨材下面の水隙、空気量の変化、そして、コンクリート硬化後の密実さなどの品質差の影響を表すと考えられる透水係数を強度試験用のコア供試体を試料として求めた。

透水係数に使用した供試体は圧縮強度用供試体と同じ方法で作製した $\phi 5 \times 10\text{cm}$ のコア供試体を用いた。試験方法を述べると次の通りである。

- 1) 試験は三軸室を用いて、加圧方式による定水位法で実施した。
- 2) 所定の加圧水圧まで徐々に上げて放置、安定した後に透水試験の計測を開始した。
- 3) 計測時間は、2時間単位で3回計測し、供試体2本の平均値を実測値とした。

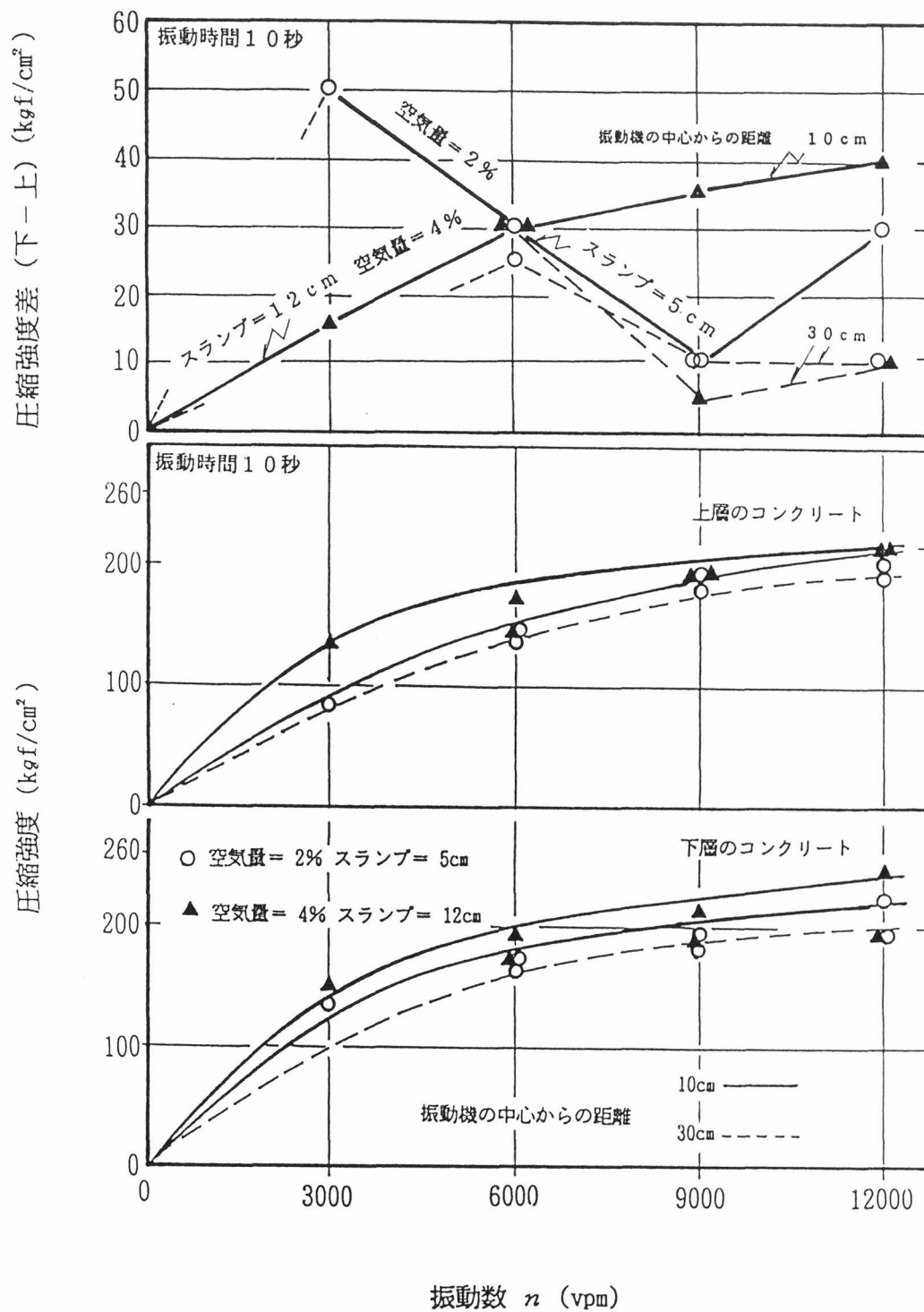


図-6.13 コンクリート床版の上、下層における圧縮強度差

4) 本試験では、加圧水圧 5.0kgf/cm^2 ，側圧 5.5kgf/cm^2 とした。

$\sigma_3 = (5.5\text{kgf/cm}^2) - (5.0\text{kgf/cm}^2) = 0.5\text{kgf/cm}^2$ として行った。

図-6.14 は、スランプ 5.0cm ，空気量 7% とスランプ 12.0cm ，空気量 7% の A E コンクリートについて空気量を等しくした場合の透水係数と振動機を中心からの距離について示したものである。

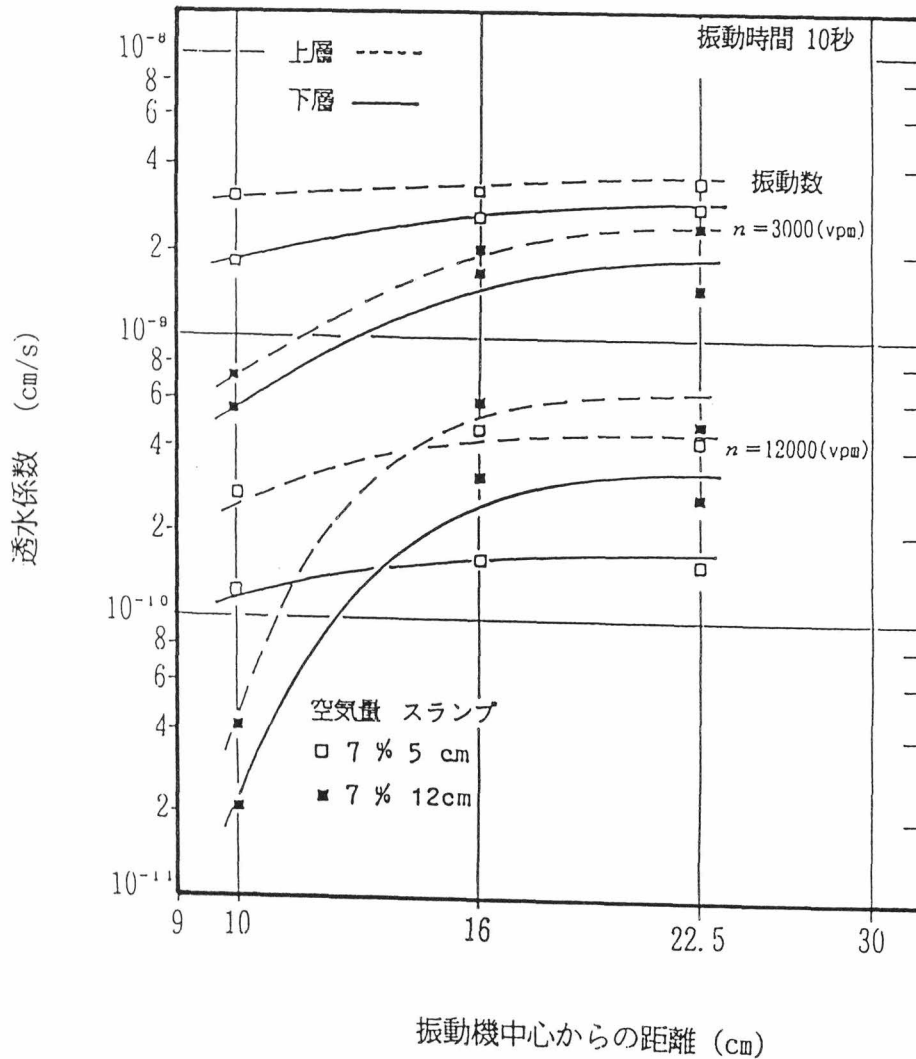


図-6.14 振動機中心からの距離による透水係数の変化

これをみると全体として、スランプ 12.0cmのコンクリートの方がスランプ 5.0cmのコンクリートより透水係数が小さいが、これは、空気量が等しいことを考えれば、スランプによる締固まりの差の影響が透水係数の差となって現れるものと考えられる。また、振動機からの距離による透水係数の変化をみると、振動数が 3000vpm の場合には、振動数 12000 vpm に比べて変化が大きくなっていることから、振動機近傍を除いて締固め効果が不十分であり12000vpm で締固めた場合には、振動機から22.5 cmの位置でも透水係数は非常に小さく、締固めによりコンクリートの密実性が増大していることを示している。

(3) 締固めの判定方法

締固めの程度と関係があると考えられる前述の透水係数、圧縮強度およびコンクリート表面のブリージング域と振動機の中心からの距離との関係を表 6.7に示した。

表 6.7 締固め作用の到達範囲に関する実験結果

コンクリートの性質		振動数 n (vpm)	測 定 要 因	振動中心からの距離 r (cm)			ブリージ ング域 r_w (cm)
空気量	スランプ			10	16	22.5	
7 %	5 cm	3000	上層の圧縮強度 (kgf/cm^2)	99.0	103	87	0
			上層の透水係数 k (10^{-10} cm/s)	31.6	33.2	48.6	
		12000	上層の圧縮強度 (kgf/cm^2)	133	134	138	28.5
			上層の透水係数 k (10^{-10} cm/s)	2.84	4.48	4.41	
	12 cm	3000	上層の圧縮強度 (kgf/cm^2)	130	140	143	4.5
			上層の透水係数 k (10^{-10} cm/s)	74.3	20.3	26.6	
		12000	上層の圧縮強度 (kgf/cm^2)	186	181	188	36.5
			上層の透水係数 k (10^{-10} cm/s)	0.44	6.1	4.8	

振動数 3000vpmについてみると、スランプ 5.0cm, 空気量 7%の場合には、強度、透水係数の何れもが締固め不良を示し、コンクリート表面のブリージング域もこれと符合しているが、振動数が 12000vpm の場合には、振動数 3000vpm の場合よりも強度は相当に増大し、また、透水係数は $r=22.5\text{cm}$ の位置においても振動数 3000vpmの場合より1桁小さい値となっていることから、ブリージング域内の全領域($r \leq 28.5\text{cm}$)が締固まっていると判断される。したがって、透水係数の結果からは圧縮強度を硬化コンクリートの品質指標と考えて、コンクリート表面のブリージング域を締固めの有効な判断の資料として差し支えないものと考えらる。

6.2.4 締固め強度による有効範囲の判定について

振動締固めの有効範囲の考え方のモデルを図-6.2 に示した。この図は締固めた強度の最大値の90%で振動機の中心からの距離 r_e を有効範囲($C = 90\%$)と定義した。(r_m : 振動による影響が無い位置での強度) また、振動締固めた後の硬化コンクリートの床版から、図-6.1 に示した位置から採取したコア供試体強度の最大値 σ_{max} に対する比 σ_r / σ_{max} (σ_r : 振動機の中心から r cm 離れた位置における強度)を締固め度 C として、 $C = 90\%$ となる位置 r_{90} およびその位置における加速度振幅 a_{90} を距離—圧縮強度および距離—加速度振幅曲線から求めた。

コンクリート床版から採取したコア圧縮強度を基準とした有効範囲のモデルを用いて実験結果の説明を圧縮強度と加速度振幅との例の関係を示したのが図-6.3 である。

実験結果の振動締固めによる有効範囲 r_{90} ($C = 90\%$)とその位置での加速度振幅 a_{90} の結果を表 6.4 に示した。

図-6.3 は、スランプ 8.0cmの場合の距離—強度—加速度振幅曲線の一例を示したもので、圧縮強度が 90%となる距離 r_{90} は、振動機の中心から約 46cmとなっている。この r_{90} は、コンクリートの性質と振動機の特性に 관계があって、スランプ 2.5cm および 8.0cm の場合には振動筒径 $\phi 30$ mm と $\phi 40$ mmの有効度が $\phi 50$ mm と $\phi 60$ mmに比較して相当に低くなっているが、スランプ 12.0cm の場合には振動機の差の影響はかなり小さくなり、さらに、図-6.11 に示したスランプ 18.0cm のコンクリートにおいては、振動機の直径にかかわらずほぼ全体が最大強度の90%以上の強度となっていた。このことは、軟練りコンクリートの場合には型枠内に打込んだ段階で既にかかなり均質に充填されていたことによるものであると考える。

表 6.4 の結果は、硬練りコンクリートには径の太い振動機を用いることが必要であるが、軟練りコンクリートに対しては、 $\phi 30$ mmの振動機でも有効であることを示している。なお、 r_{90} を先に述べた気泡およびブ

リージング域の半径 r_A , r_W と比較するとどの場合でも大きくなっているから、気泡の発生領域の範囲よりもさらに広いブリージング域の範囲 r_W を振動締固めの有効範囲を評価する指標とすれば硬化後の圧縮強度についても安全側となるものと考ええる。

これまで、振動締固めによって生じるコンクリート表面の気泡、ブリージング域の範囲を締固めによる有効範囲の判断に用いることの妥当性を述べてきた。

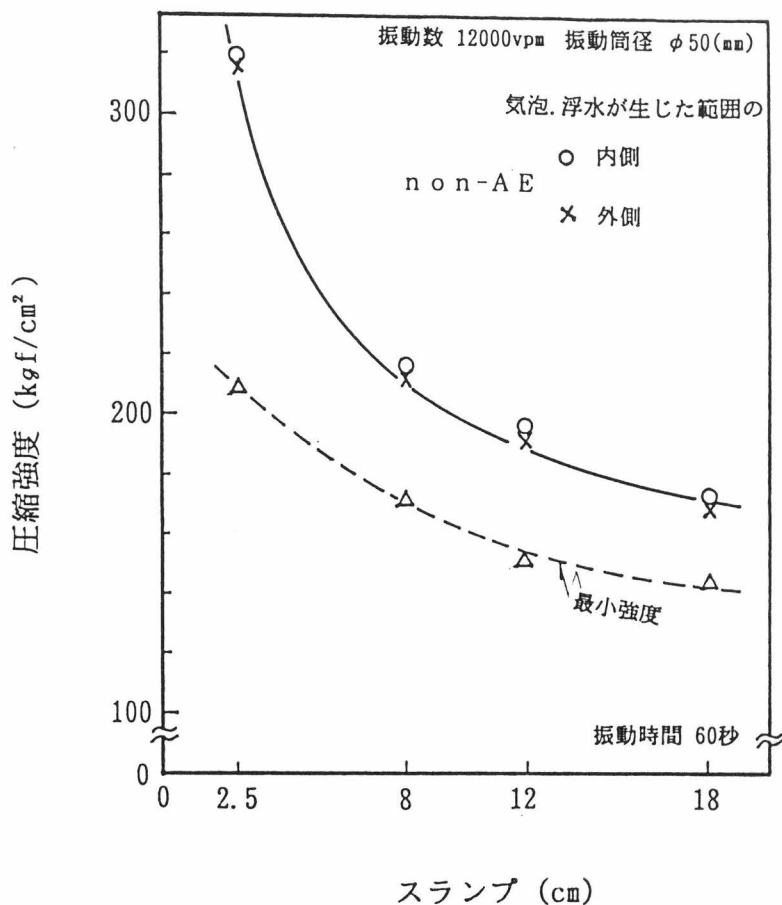


図-6.15 コンクリートの性質が変化した場合の気泡、ブリージング域における強度と最小強度との関係

図-6.15 に示したように、コンクリートの性質が変わっても気泡およびブリージング域を境界とした内側と外側の位置での強度は、コンクリートの最小強度よりも大きくなっていてその強度はコンクリートの性質の違いによる差となっている。このことは、既に判断の指標とした気泡およびブリージング域内を有効範囲としたことは適切であると考ええる。